



Technische
Universität
Braunschweig



SEMINAR

STUDIENSEMINAR FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte

**Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische
Energieanlagen - elenia**

Wintersemester 2015/2016

Braunschweig, 03.02.2015

Inhaltsverzeichnis

Zeitplan	3
-----------------	----------

Gruppe 1 - 20.01.2016

Gellermann - Was kann eine virtuelle Synchronmaschine (VISMA)?	5
Bericht	5
Präsentation	8
Rakidzija - Arten und Anwendung von Sternpunktterdung	17
Bericht	17
Präsentation	21
Kaufmann - Elsbergs "Blackout": Nur Hollywood oder mögliche Realität?	34
Bericht	34
Präsentation	37
Grobelny - Energiemanagement in Haushalten und Industrie	50
Bericht	50
Präsentation	54
Hankers - Erlösmöglichkeiten für die Vermarktung von PV- und Windstrom	66
Bericht	66
Präsentation	70
Schmoll - Siliziumkarbid: Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis	97
Bericht	97
Präsentation	104
Cholewa - MOSFET oder IGBT: Welches ist der bessere Halbleiterschalter?	117
Bericht	117
Präsentation	124
Rührmann - Aufbau und praktische Umsetzung von Stoßstromgeneratoren (8/20, 10/350)	138
Bericht	138
Präsentation	142
Fitzl - Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen	153
Bericht	153
Präsentation	157

Gruppe 2 - 03.02.2016

Gartner - Auftriebskraftwerke zur möglichen Stromversorgung von Einfamilienhäusern	170
Bericht	170
Präsentation	174
Trevino - Protection of HVDC Grids, Challenges and possible Solutions	190
Bericht	190
Präsentation	194
Wang - Schalter in höheren Netzspannungsebenen	210
Bericht	210
Präsentation	214
Schubert - Isolierstoffprüfung in der Energietechnik	223
Bericht	223
Präsentation	226
Xu - Prüffelder in der Hochspannungstechnik	236
Bericht	236
Präsentation	240
Busch - Lithium-Ionen-Zellen - Produktion & Forschung in Deutschland	262
Bericht	262
Präsentation	266
Ziegler - Lithium-Ionen-Batterien - Herstellung in Deutschland	279
Bericht	279
Präsentation	283
Wolff - Überblick von Batterieprüfvorschriften für Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland	293
Bericht	293
Präsentation	297
Reinheimer - Sensorik zur Charakterisierung von Batteriezellen	309
Bericht	309
Präsentation	314
Schroeder - Berührunglose Temperaturmessung unter Extrembedingungen	325
Bericht	325
Präsentation	325
Xu - Umsetzung von Überspannungsschutz für Photovoltaikanlagen	339
Bericht	339
Präsentation	342

Zeitplan am 20.01.2016 im Haus der Wissenschaft (Raum Veolia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
09:00 – 10:30	Vortrag	Eike Alexander Gellermann	Was kann eine virtuelle Synchronmaschine (VISMA)?
	Vortrag	David Rakidzija	Arten und Anwendung von Sternpunktterdung
	Vortrag	Daniel Kaufmann	Elsbergs "Blackout": Nur Hollywood oder mögliche Realität?
10:30 – 11:00	Gruppenbild		
11:00 – 12:30	Vortrag	Götz-Nikolaus Grobelny	Energiemanagement in Haushalten und Industrie
	Vortrag	Robert Hankers	Erlösmöglichkeiten für die Vermarktung von PV- und Windstrom
	Vortrag	Georg Schmoll	Siliziumkarbid: Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis
12:30 – 13:30	Mittag		
13:30 – 15:00	Vortrag	Sven Cholewa	MOSFET oder IGBT: Welches ist der bessere Halbleiterschalter?
	Vortrag	Niklas Rühmann	Aufbau und praktische Umsetzung von Stoßstromgeneratoren (8/20, 10/350)
	Vortrag	Felix Fitzl	Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen

Zeitplan am 03.02.2016 im Haus der Wissenschaft (Raum Veolia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
09:00 – 10:30	Vortrag	Julia Gartner	Auftriebskraftwerke zur möglichen Stromversorgung von Einfamilienhäusern
	Vortrag	Fernando Yanez Trevino	Protection of HVDC Grids, Challenges and Possible Solutions
	Vortrag	Zhe Wang	Schalter in höheren Netzspannungsebenen
10:30 – 11:00	Gruppenbild		
11:00 – 12:30	Vortrag	Yannick Schubert	Isolierstoffprüfung in der Energietechnik
	Vortrag	Marvin Lee Schroeder	Berührungslose Temperaturmessung unter Extrembedingungen
	Vortrag	Jörn Busch	Lithium-Ionen-Zellen – Produktion & Forschung in Deutschland
12:30 – 13:30	Mittag		
13:30 – 14:30	Vortrag	Sven Ziegler	Lithium-Ionen-Batteriesysteme – Herstellung in Europa
	Vortrag	Sascha Wolff	Überblick von Batterieprüfvorschriften für Lithium-Ionen Batterien in Deutschland
14:30 – 15:00	Pause		
15:00 – 16:00	Vortrag	Uili Wobeto Reinheimer	Sensorik zur Charakterisierung von Batteriezellen
	Vortrag	Ou Xu	Prüffelder in der Hochspannungstechnik

Was kann eine virtuelle Synchronmaschine (VISMA)?

What are the abilities of a virtual synchronous machine (VISMA)?

B.Sc. Eike Gellermann

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - **elenia**, e.gellermann@tu-bs.de

Kurzfassung

Das von Ralf Hesse an der TU Clausthal entwickelte Konzept der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) wurde untersucht, um herauszustellen wie gut es eine elektromechanische Synchronmaschine tatsächlich elektrisch nachbildet und inwiefern es zu den Systemdienstleistungen Spannungsqualität und Frequenzhaltung, insbesondere im Vergleich zu herkömmlichen Wechselrichtern, beitragen kann. Die VISMA erlaubt die Netzanbindung beliebiger Gleichspannungserzeuger mittels eines gesteuerten Wechselrichters sodass diese im Netz elektrisch wie Synchrongeneratoren erscheinen. Dadurch kann die Integration von Brennstoffzellen und regenerativen Erzeugern erleichtert und die Abhängigkeit der elektrischen Energieversorgung von Synchrongeneratoren verringert werden.

Abstract

The concept of a Virtual Synchronous machine (VISMA), developed by Ralf Hesse at TU Clausthal was analyzed to expose how accurately it really simulates an electromechanic synchronous machine and to what extent it can contribute to voltage and frequency quality, particularly compared to conventional inverters. The VISMA allows the connection of DC power sources to the electrical grid through a controlled inverter in order to make them electrically appear as a synchronous machine. This can simplify the integration of fuel cells and regenerative sources and reduce the dependency of grid stability on synchronous generators.

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende in Deutschland und dem mit ihr einkehrenden Ausbau der erneuerbaren Energien stellt sich immer mehr die Frage, wie das Stromnetz trotz des vermehrten Wegfalls von Synchrongeneratoren in großen Kraftwerken und dem steigenden Einsatz leistungselektronischer Wechselrichter zukünftig stabilisiert werden kann. Das Ziel der VISMA ist es, einen leistungselektronischen Wechselrichter so zu steuern, dass er die elektrischen Eigenschaften eines Synchrongenerators vollständig nachbildet.

2 Grundidee

Die Auslegung, Eigenschaften und Betriebsweise der elektrischen Netze standen bisher in enger Beziehung mit den Eigenschaften der elektromechanischen Synchronmaschine. Der Grundgedanke der VISMA beruht auf der Nachbildung einer Synchronmaschine durch einen dynamischen Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis und eine Recheneinheit zur echtzeitigen Bestimmung der elektrischen, magnetischen und mechanischen Maschinengrößen anhand eines algorithmischen Modells der Maschine. Die Algorithmen umfassen das vollständige Differentialgleichungssystem einer elektrisch erregten Synchronmaschine.

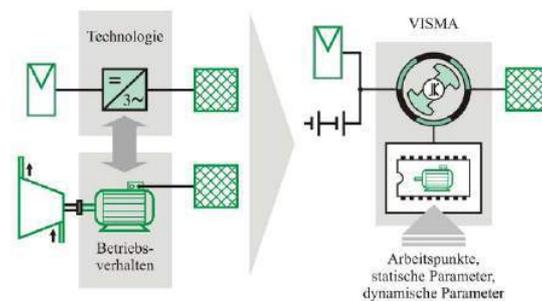


Abbildung 1 Grundidee der VISMA

Die grundlegende Funktionsweise beruht auf der

1. **Erfassung der Netzspannung** am Netzanschlusspunkt des Systems,
2. **Berechnung** der sich entsprechend dieser Spannung einstellenden Maschinenströme,
3. Überführung dieser errechneten Ströme als **Stromsollwerte** zum Phasenstromregler des Wechselrichters
4. **Einprägung** dieses Stromes in das Netz über den Wechselrichter.

3 Was kann eine VISMA?

3.1 Nachbildung einer Synchronmaschine

Die Grundfunktion der VISMA ist es, die elektrischen Eigenschaften der Synchronmaschine vollständig nachzubilden. Dies wird, unter Vernachlässigung einiger sekundärer oder unerwünschter Vorgänge in realen Maschinen wie polradabhängige Streuung, Stromverdrängung oder Sättigung, durch das Lösen eines Differentialgleichungssystems, das alle wesentlichen physikalischen und elektrotechnischen Größen miteinander verknüpft, realisiert. Darüberhinaus wurden weitere Funktionen implementiert.

3.2 Oberschwingungskompensation

Unabhängig von der Grundfunktion kann ein Algorithmus zur Oberschwingungskompensation aufgerufen werden. Nachdem die Netzspannung erfasst und auf ihre frequenzbezogene Zusammensetzung untersucht wurde, kann dieser die ausgegebenen Stromsollwerte so einstellen, dass die Oberschwingungsanteile der Netzspannung reduziert werden.

Gemäß des Verbraucherzählpfeilsystems bedeutet die Einprägung eines gleichphasigen Stroms hier eine Belastung der Netzspannung (siehe Abbildung 2 links).

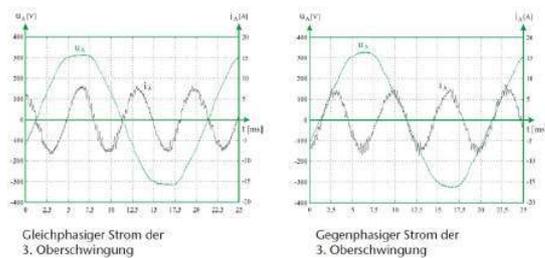


Abbildung 2 Einprägung eines Stroms der 3. Oberschwingung und dessen Einfluss auf die Spannung am Netzanschlusspunkt

3.3 Unsymmetriekompensation

Ebenfalls unabhängig von den anderen Funktionen kann ein Algorithmus zur Unsymmetriekompensation aufgerufen werden. Er erkennt korrigiert Unsymmetrien zwischen den drei Netzphasen, die z.B. durch einphasige Belastung entstehen und verbessert so die Spannungsqualität am Netzanschlusspunkt. Zu diesem Zweck muss der Wechselrichter die Fähigkeit haben, unsymmetrische Ströme einzuspeisen.

Werden die Funktionseinheiten Oberschwingungs- und Unsymmetriekompensation mitbetrieben, wird der Sollwert des Wechselrichters aus den Maschinenströmen und den Oberschwingungs- und Unsymmetriekompensationsströmen durch Superposition gebildet.

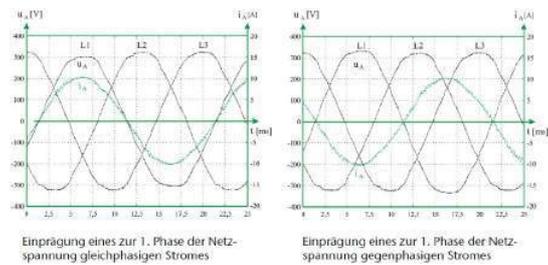


Abbildung 3 Einprägung eines Stroms auf nur eine Phase des Drehstromsystems und dessen Einfluss auf die Spannung am Netzanschlusspunkt

3.4 Solidarischer Wirkleistungsausgleich

Durch die genaue Erfassung der Netzspannung am Netzanschlusspunkt werden Abweichungen von der Netzfrequenz erkannt. Das virtuelle Trägheitsmoment der VISMA sorgt dafür, dass bei erhöhter Frequenz Energie aus dem Netz in den Zwischenkreis transportiert wird. Dieser Vorgang tritt an allen angeschlossenen VISMA auf, sodass die überschüssige Wirkleistung gleichmäßig auf alle Zwischenkreise aufgeteilt wird. Der inverse Vorgang findet statt, wenn die Frequenz unterhalb der Netzfrequenz ist. Voraussetzung ist, dass Energie im Zwischenkreis vorhanden ist.

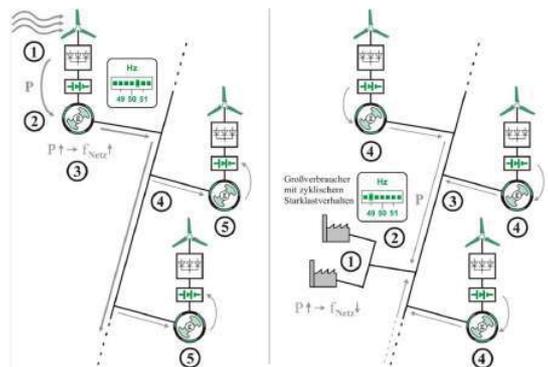


Abbildung 4 Solidarischer Wirkleistungsausgleich

3.5 Solidarischer Blindleistungsausgleich

Im Gegensatz zur Frequenz, die im gesamten Verbundnetz gleich ist, kann die Netzspannung lokal sehr unterschiedlich sein. Um die Spannung zu halten, ist Blindleistung erforderlich, die ebenfalls von einer VISMA bereitgestellt werden kann. Selbst wenn kein Zwischenkreisspeicher vorhanden ist, kann die gesamte vorhandene Scheinleistung als Blindleistung bereitgestellt werden, sodass eine VISMA - auch ohne eigenen Erzeuger mit Zwischenkreisspeicher - zur Spannungshaltung beitragen kann.

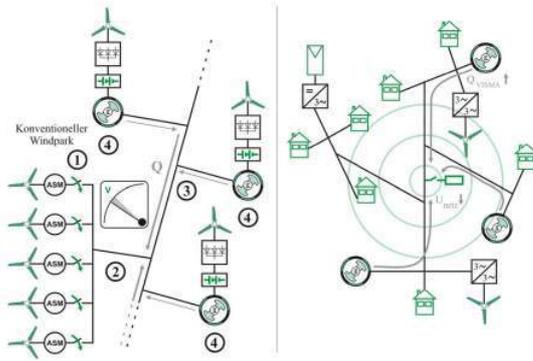


Abbildung 5 Solidarischer Blindleistungsausgleich

3.6 Netzentpendelung

Netzentpendelungen in Gestalt periodischer Schwankungen des Netzwinkels werden in elektromechanischen Synchronmaschinen durch Kurzschlusskäfige gedämpft, um ein Aufschwingen des Systems zu verhindern. Dieser Kurzschlusskäfig ist ebenfalls algorithmisch in der VISMA modelliert, hat aber gegenüber der elektromechanischen Maschine den Vorteil, dass die Dämpfungsleistung nicht in Wärme umgesetzt wird, sondern direkt in den Zwischenkreisspeicher eingetragen werden kann.

3.7 Inselnetzbetrieb

Da die VISMA gemäß ihrer Funktionsweise eine spannungsgesteuerte Stromquelle darstellt, kann sie nicht ohne weiteres ein Inselnetz aufbauen. Im Parallelbetrieb mit einem Inselnetzwechselrichter können jedoch die Fähigkeiten der VISMA zur Stabilisierung des Netzes genutzt werden, sodass auch Schwarzstartfähigkeit möglich wäre, wenn die Energieversorgung des Rechners mit einem Akku oder aus dem Zwischenkreis gesichert ist.

4 Kritische Würdigung

Das Konzept der Virtuellen Synchronmaschine beinhaltet bereits viele Aspekte, die über die grundsätzliche Nachbildung der elektromechanischen Synchronmaschine hinausgehen. Aus der Motivation heraus, regenerative Erzeuger mit einem Gleichspannungszwischenkreis besser in das europäische Verbundnetz integrieren zu können, wurden viele Eigenschaften realisiert, die die Anforderungen, die heutzutage an Erzeuger bezüglich der Netzdienstleistungen gestellt werden, teilweise weit übertreffen.

Besondere Anforderungen gibt es dabei an den Zwischenkreisspeicher, der einen großen Energieinhalt, hohe Zyklenfestigkeit und große Leistungen bereitstellen muss. Hierfür kann das Zusammenwirken verschiedener Technologien wie kapazitiver, elektrochemischer und kinetoelektrischer Speicher genutzt werden.

Damit das System echtzeitfähig ist, muss einerseits die Erfassung des Spannungsverlaufs am Netzanschlusspunkt möglichst ohne Phasenverzug stattfinden und andererseits

die Recheneinheit der VISMA eine gewisse Leistungsfähigkeit aufweisen, um das Differentialgleichungssystem schnell genug zu lösen und die Ergebnisse dem Phasenstromregler zur Verfügung zu stellen. Ist dies nicht der Fall, können aber weitere Algorithmen zur Korrektur programmiert werden.

Ein weiterer, zukünftig möglicherweise entscheidender Vorteil ist, dass während des Betriebs auf alle Parameter zugegriffen werden kann, sodass die Eigenschaften des Systems online an die jeweilige Netzsituation angepasst werden könnten. Damit wird ein hohes Maß an Flexibilität erreicht, das gerade vor dem Hintergrund schwankender Erzeugungsleistungen aus Windenergie- und PV-Anlagen für Netzbetreiber von großem Interesse sein könnte.

Obwohl das Potential der VISMA gerade im Zuge der Energiewende sehr groß ist, scheint das Interesse, weiter an dieser Technologie zu forschen und sie zu nutzen noch gering. Dabei könnten ihre Vorteile nicht nur im europäischen Verbundnetz, sondern gerade in vergleichsweise instabilen Netzen besonders zur Geltung kommen.

5 Fazit

Die VISMA bildet durch das Zusammenwirken von Spannungsmessung, Recheneinheit und Wechselrichter eine elektrische Nachbildung der elektromechanischen Synchronmaschine mit dem Ziel, beliebige Gleichspannungserzeuger wie Photovoltaikanlagen, Brennstoffzellen oder Windenergieanlagen mit Gleichspannungszwischenkreis besser in das Versorgungsnetz einbinden zu können.

Durch die o.g. Fähigkeiten hat sie das Potential, in Zukunft insbesondere in dezentralen Netzen eine wichtige Rolle zu spielen. Sie bietet nicht nur statische Vorteile bei der Einbindung erneuerbarer Energien, sondern große Flexibilität in der Programmierung und Parametrisierung. Durch zusätzliche Algorithmen zur Oberschwingungs- und Unsymmetriekompensation kann die Spannungsqualität weiter erhöht werden. Falls mehrere Einheiten an ein Netz angeschlossen sind, stellt sich durch die grundsätzliche Funktionsweise automatisch ein solidarischer Wirk- und Blindleistungsausgleich ein, ohne dass hierfür eine Kommunikationsinfrastruktur nötig wäre.

Somit kann die Virtuelle Synchronmaschine ein wichtiger Schritt zur besseren Integration regenerativer (und anderer) Erzeuger in das elektrische Energieversorgungsnetz werden, ohne dass die Netzqualität unter deren steigender Anzahl abnimmt.

6 Literatur

- [1] Hesse, R.: Virtuelle Synchronmaschine
Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2007.
- [2] Turschner, D.: Die Virtuelle Synchronmaschine (VISMA) zur Einbindung regenerativer Erzeuger in elektrische Netze
Vortrag an der TU München, 10.02.2011
<https://www.vde.com/de/regionalorganisation/bezirksvereine/suedbayern/facharbeit>



Was kann eine Virtuelle Synchronmaschine (VISMA)?

20. Januar 2016 | Seminarvortrag | Eike
Gellermann

Agenda

- Einleitung
- Motivation, Grundidee
- Aufbau, Funktion
- Zusammenfassung
- Fragen

Einleitung

- **Dissertation:**

Ralf Hesse: Virtuelle Synchronmaschine (2007)



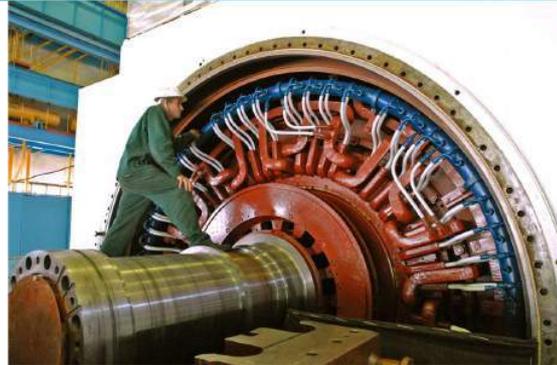
Agenda

- Einleitung
- 🌐 Motivation, Grundidee
 - Aufbau, Funktion
 - Zusammenfassung
 - Fragen

Motivation

Folgen der Energiewende:

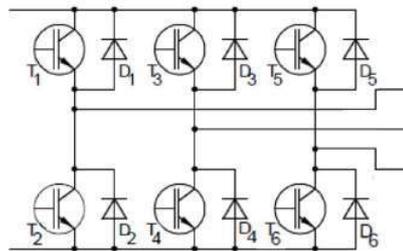
- Weniger große, zentrale Kraftwerke
→ **Weniger Synchrongeneratoren**
- Mehr Erzeuger mit DC-Zwischenkreis
→ **Mehr Halbleiterwechselrichter**



Quelle: Wikipedia

→ **Probleme?**

- ◆ **Frequenzhaltung**
- ◆ **Spannungshaltung**
- ◆ **Spannungsform**
- ◆ ...

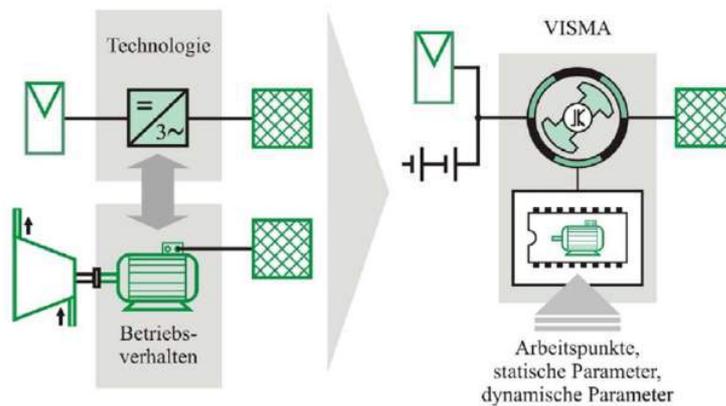


20.01.2016 | Eike Gellermann | Virtuelle Synchronmaschine | Seite 5



Grundidee der VISMA

Elektrisches Verhalten einer Synchronmaschine vollständig nachbilden.



1. Erfassung der Netzspannung
2. Mathematisches Modell einer Synchronmaschine
3. Einspeisung der Statorströme

→ Spannungsgesteuerte Stromquelle



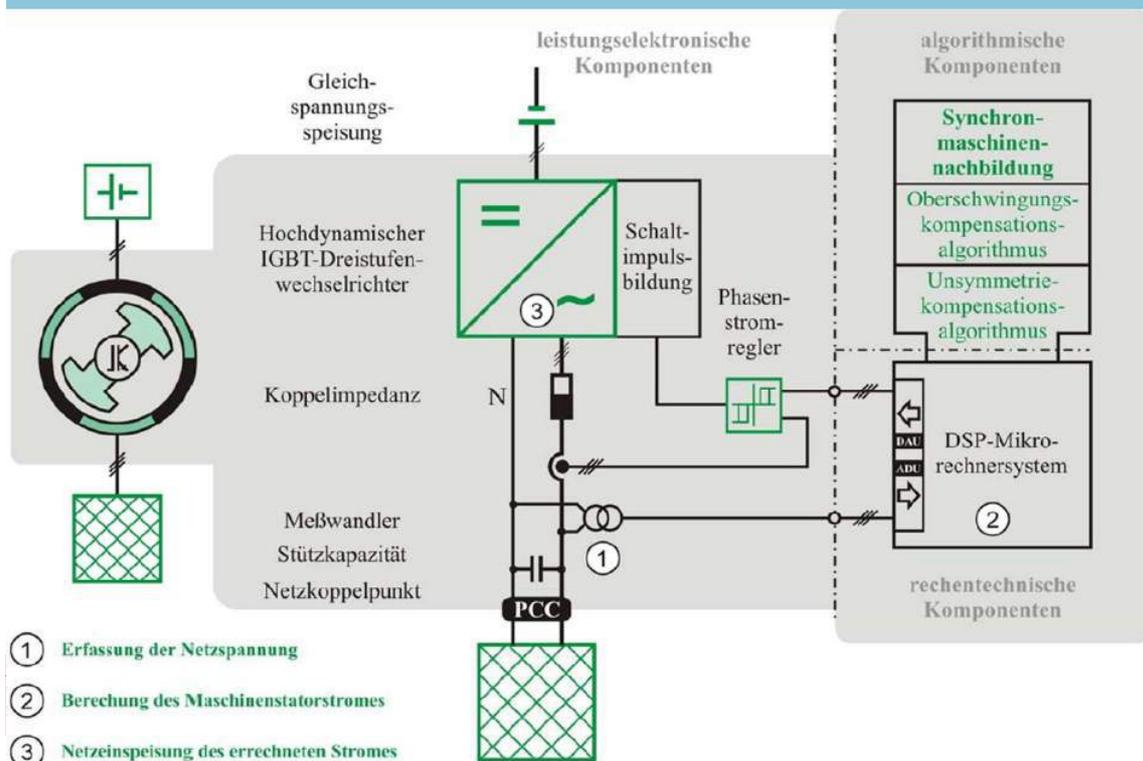
20.01.2016 | Eike Gellermann | Virtuelle Synchronmaschine | Seite 6



Agenda

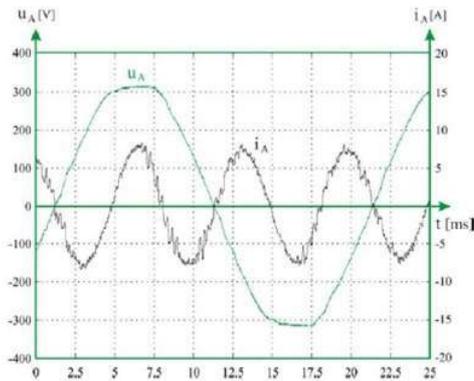
- Einleitung
- Motivation, Grundidee
- 🌐 Aufbau, Funktion
- Zusammenfassung
- Fragen

Aufbau, Funktion

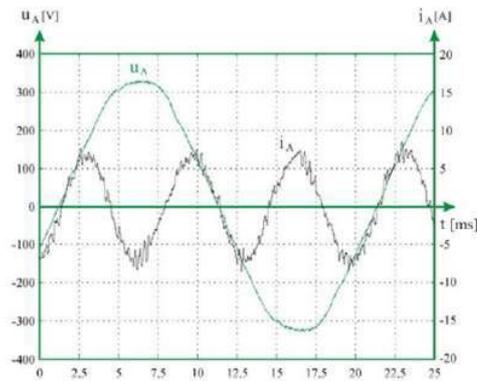


Oberschwingungskompensation

- Ausgangsspannung und -strom werden auf ihre frequenzbezogene Zusammensetzung untersucht.



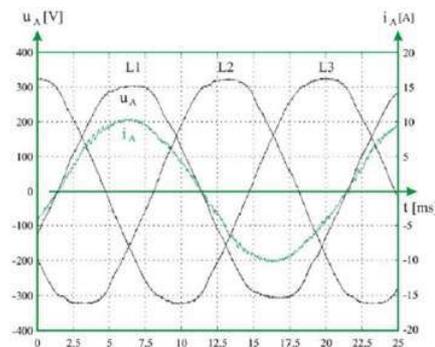
Gleichphasiger Strom der 3. Oberschwingung



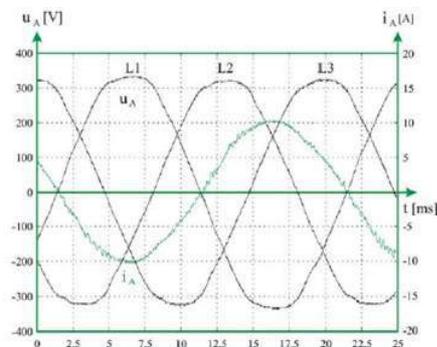
Gegenphasiger Strom der 3. Oberschwingung

Unsymmetriekompensation

- Unsymmetrie z.B. durch einphasige Verbraucher bzw. Erzeuger
- Langsame I-Regler, da
 1. Die Grundfunktion (Synchronmaschine) vorrangig und ohne Quereinflussung Zugriff auf den Wechselrichter benötigt
 2. Oberschwingungen und Unsymmetrien meist im Tagesgangrhythmus auftreten

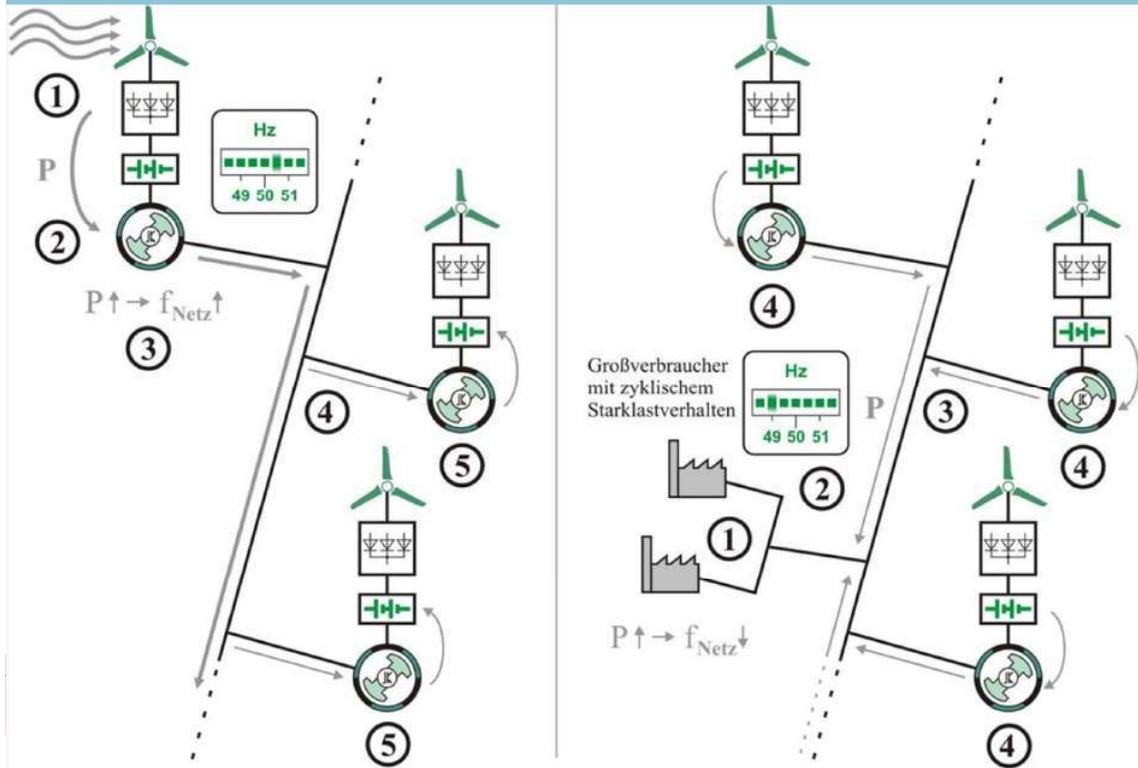


Einprägung eines zur 1. Phase der Netzspannung gleichphasigen Stromes

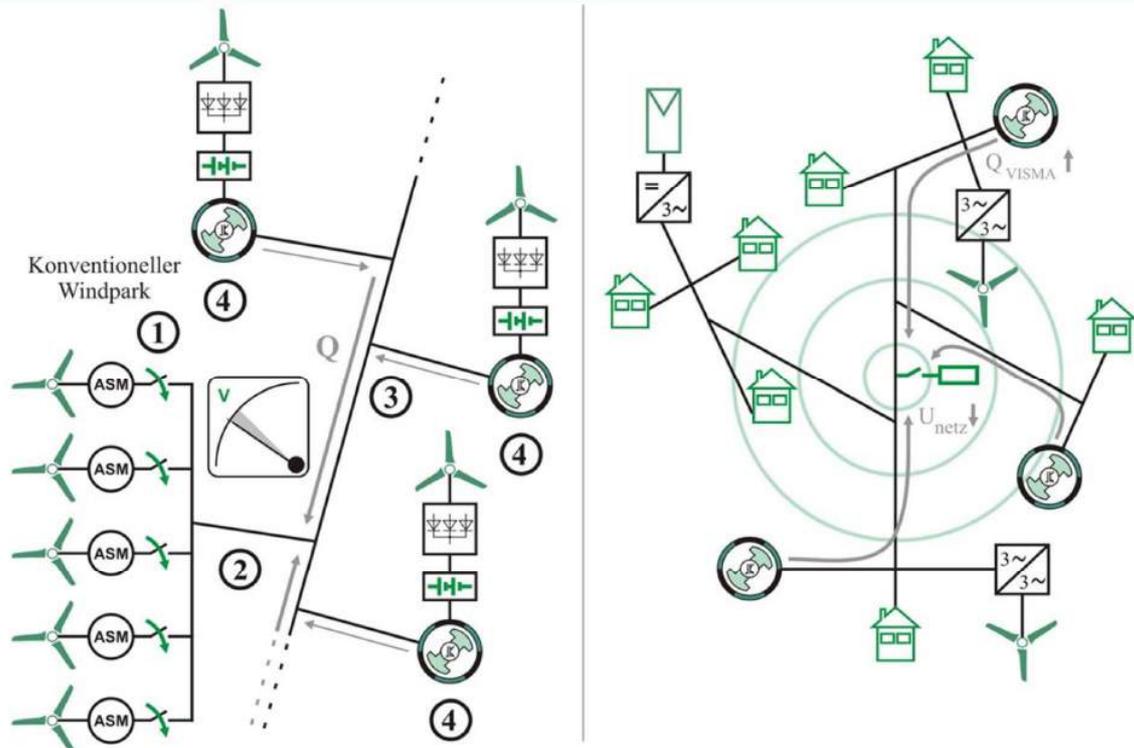


Einprägung eines zur 1. Phase der Netzspannung gegenphasigen Stromes

Solidarischer Wirkleistungsausgleich



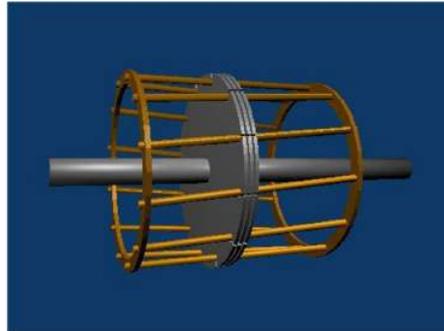
Solidarischer Blindleistungsausgleich



Weitere Eigenschaften

Kurzschlusskäfig der Synchronmaschine ist algorithmisch in der VISMA hinterlegt.

Vorteil gegenüber SM: Die anfallende Dämpfungsleistung wird nicht in Wärme umgesetzt, sondern in den Zwischenkreisspeicher getragen.



Inselnetzbetrieb bei Kopplung an einen inselnetzbildenden Wechselrichter

Schwarzstartfähigkeit wenn der Rechner versorgt ist (Akku / Zwischenkreis)

Agenda

- Einleitung
- Motivation, Grundidee
- Aufbau, Funktion
- 🌐 Zusammenfassung
- Fragen

Zusammenfassung: Was kann eine Virtuelle Synchronmaschine (VISMA)?

- Elektrisches Verhalten der **Synchronmaschine** nachbilden
- **Oberschwingungen** kompensieren
- **Unsymmetrien** kompensieren
- Zur **Frequenzhaltung** beitragen (Wirkleistungsausgleich)
- Zur **Spannungshaltung** beitragen (Blindleistungsausgleich)
- Positive und negative **Primärregelleistung** bereitstellen
- **Netzpendelungen** dämpfen
- **Inselnetz** stabilisieren
- Evtl. **schwarzstartfähig** sein
- Im Betrieb **verändert** werden

→ **Zur besseren Integration erneuerbarer Energien beitragen!**

Agenda

- Einleitung
- Motivation, Grundidee
- Aufbau, Funktion
- Zusammenfassung

 Fragen

Ende

- Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Dissertation zum Thema

Ralf Hesse: Virtuelle Synchronmaschine

Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2007

ISBN: 978-3-89720-919-0



20.01.2016 | Eike Gellermann | Virtuelle Synchronmaschine | Seite 17



Arten und Anwendung von Sternpunktterdung

Neutral earthing in power grids

David Rakidzija, B. Sc., Braunschweig, d.rakidzija@tu-bs.de

Kurzfassung

Einpolige Erdschlüsse stellen die häufigste Fehlerursache in Energieversorgungsnetzen dar. Sie führen zu unerwünschten Fehlerströmen und Spannungen, welche die Betriebsmittel belasten und die Versorgungssicherheit gefährden. Zudem besteht die Gefahr von Personenschäden. Durch die Sternpunktterdung können Fehlerströme wirkungsvoll begrenzt werden. So kann das Risiko für Betriebsmittel und Personenschäden herabgesetzt werden. Zudem erhöht sich die Versorgungssicherheit, weil Fehler nicht zu einer sofortigen Abschaltung führen müssen. Welche Art der Sternpunktterdung genutzt wird hängt von der Ausdehnung des Netzes, der Spannungsebene und der Netzkomponenten ab.

Abstract

Line to ground faults are the most common type of faults found in power grids. They lead to unwanted currents and voltages. High earth currents may result in personal injury while high voltages across the remaining lines pose a threat of failure due to insulation breakdown. Neutral earthing is used to prevent these kinds of risks by limiting fault currents. The actual method used for neutral earthing depends on the dimensions of the power grid, the rated voltage and the components present in the grid.

1 Einleitung

Die Sternpunktterdung (SPE) findet Verwendung in Drehstromsystemen der Energieversorgung aller Spannungsebenen. Sie ist ein Spezialgebiet der Energietechnik und wird in ausgedehnten Netzen der Energieversorgungsunternehmen aber auch in Industriebetrieben eingesetzt. Relevanz hat die Sternpunktterdung im Fehlerfall, wenn im Netz Asymmetrien auftreten, also vor allem dann, wenn sich die Ströme des Dreiphasensystems im Sternpunkt nicht zu Null summieren. Dies soll an einem Beispiel aufgezeigt werden. Dazu wird der einpolige Erdschluss betrachtet, welcher die häufigste Fehlerursache im Netz darstellt (etwa 80% aller möglichen Fehler sind einpolige Erdschlüsse [1]). Es gibt drei Arten der SPE, diese sind in Abb. 1 dargestellt. Ziel ist bei jeder Art der SPE eine Begrenzung des Kurzschlussstroms oder zur Begrenzung der mit dem einpoligen Kurzschluss verbundenen Spannungsunsymmetrie. Das ist vor allem unter dem Gesichtspunkt des Personenschutzes (Berührungsspannung oder Schrittspannung) und des Schutzes vor Schäden an Betriebsmitteln (z.B. durch thermische Überbelastung).

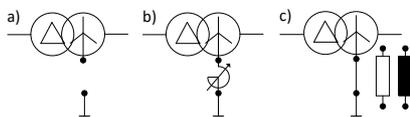


Abbildung 1: a) isolierte SPE (ISPE/O[hne]SPE), b) Resonanz-SPE (RSPE), niederohmige(starre)-SPE (NOSPE).

2 Theoretische Grundlagen

Zur Berechnung von Fehlern im Netz kann auf verschiedene Modelle und Berechnungsverfahren zurückgegriffen werden. Im allgemeinen Fall bietet sich

die Anwendung der Methode der „symmetrischen Komponenten“ [2] [1] [3] [4] [5] an, welche auf dem Superpositionsprinzip beruht. Hierzu wird das unsymmetrische, fehlerbehaftete Drehstromsystem in drei entkoppelte und symmetrische Komponenten zerlegt und transformiert. Diese Komponenten heißen Mit-, Gegen- und Nullsystem (MG0-System). Im symmetrischen Fehlerfall sind diese Einzelsysteme voneinander unabhängig. So lässt sich der symmetrische Fehler mit Hilfe eines einphasigen ESB berechnen (Gegen,- und Nullsystem sind in diesem Fall passiv).

Im unsymmetrischen Fehlerfall beeinflussen sich diese Komponenten gegenseitig. Diese Beeinflussung wird durch eine passende Verschaltung der MG0-Systeme berücksichtigt. Dazu werden die sogenannten Fehlerbedingungen bestimmt. Je nach Fehlerart, werden die MG0-Systeme in Serie oder parallelgeschaltet. Man spricht daher bei Netzfehlern auch von „Serien-“ und „Parallelfehlern“ [3]. Es erfolgt schließlich die Berechnung des Fehlerstroms im Bildbereich. Am Ende erfolgt eine Rücktransformation und Berechnung der Originalgrößen [3].

Für diese Arbeit soll alternativ auf die „Methode der Ersatzspannungsquelle“ [4] zurückgegriffen werden. Sie erlaubt für einfache Netzwerke eine schnelle Berechnung. Folgende Schritte werden dafür durchgeführt:

1. Die treibende Spannung wird durch eine Ersatzspannungsquelle am Fehlerort ersetzt.
2. Die treibende Quellenspannung der Einspeisung wird zu Null gesetzt (Innenwiderstand bleibt bestehen).
3. Nun wird die Impedanz Z_{tot} des Kurzschlussstrompfads bestimmt und das Netzwerk in ein einfaches ESB überführt (Abb. 2).

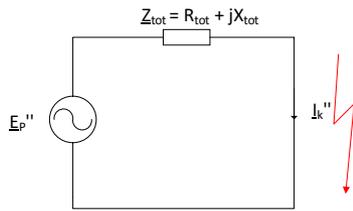


Abbildung 2: Finales Ersatzschaltbild der Kurzschlussstrombahn zur Berechnung des Effektivwerts I_k' .

Für die Dimensionierung von Schaltanlagen ist nicht der zeitliche Verlauf des Kurzschlussstroms von Interesse, sondern der Effektivwert. I_k'' ist nach DIN VDE 0102 definiert. Er lässt sich anhand Abb. 2 bestimmen (Glg. 1):

$$I_k'' = \frac{E_p''}{Z_{tot}} \Rightarrow I_k'' = \frac{E_p''}{\sqrt{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}}$$

Dies soll nun an einem Beispiel (Abb. 3) aufgezeigt werden.

3 Hauptteil / Erkenntnisse

3.1 ISPE/OSPE

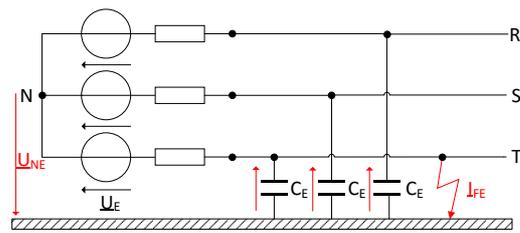


Abbildung 3: Erdschluss in einem isoliert betriebenen Netz.

Betrachtet wird eine einfache Netznachbildung aus einer dreiphasigen Quellenspannung, Längsimpedanzen und den L-E-Kapazitäten. Im Falle eines Isolationsversagens kann sich in isoliert betriebenen Netzen mangels Rückleitung zum Sternpunkt der Einspeisung kein Kurzschlussstrom ausbilden. Es fließt dann lediglich ein sehr kleiner Erdfehlerstrom I_{FE} über die Erdkapazitäten C_E der Leitungen. Man spricht daher auch vom *Erdschluss* [4]. Nach dem Verfahren wird die treibende Spannung nun zu Null gesetzt und an der Fehlerstelle die Ersatzspannungsquelle $U_F = U_n/\sqrt{3}$ eingefügt. Die Innenwiderstände der Quelle und die Leitungsimpedanzen sind klein gegenüber den kapazitiven Reaktanzen $1/j\omega C_E$ und können daher vernachlässigt werden [4]. Daraus lässt sich folgendes ESB gewinnen (Abb. 4):

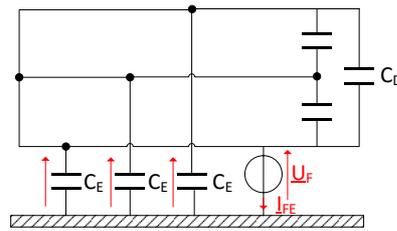


Abbildung 4: Ersatzschaltbild nach der Methode der ESB.

Die Durchgriffskapazitäten C_D sind kurzgeschlossen und können ebenfalls vernachlässigt werden. Dadurch reduziert sich das ESB auf eine einfache Darstellung, wie sie bereits in Abb. 2 gefordert wurde:

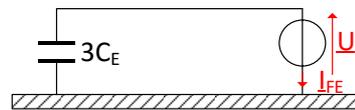


Abbildung 5: Finales ESB zur Berechnung des Erdschlussfehlerstroms.

Der Betrag des Erdschlussstroms lässt sich nun nach Glg. 1 wie folgt berechnen:

$$I_{FE} = \sqrt{3} U_n \omega C_E$$

Aus dieser Gleichung wird klar, dass der Erdschlussfehlerstrom abhängig von der Spannungshöhe und der Erdkapazität C_E ist und damit von der Netzausdehnung! Ist der Fehlerstrom ausreichend klein, erfolgt im Nulldurchgang eine Selbstlöschung. In 10-kV- und 20-kV-Freileitungsnetzen mit isolierten Sternpunkten tritt die angestrebte Selbstlöschung auf, solange $I_{FE} < 35 \text{ A}$ [1] ist. Diese sogenannten *Erdschlusswischer* haben kaum Einfluss auf den Netzbetrieb.

Durch den Spannungszusammenbruch werden die gesunden Phasen beeinflusst. Dazu ist der *Erdfehlerfaktor* δ definiert als:

$$\delta = \frac{U_{LEmax}}{U/\sqrt{3}}$$

Bei der ISPE beträgt $\delta = \sqrt{3}$. Die gesunden Phasen nehmen den $\sqrt{3}$ -fachen Wert der Nennspannung an! Dies beansprucht die Betriebsmittel zusätzlich und kann zu weiteren Fehlern führen (es folgt der *doppelte Erdschluss*). Zusätzlich zu diesen *betriebsfrequenten Überspannungen* können durch Ausgleichsvorgänge noch *transiente Überspannungen* auftreten, die bis zu den 2,5-fachen Wert der Nennspannung erreichen können [4]. Dies kann letztlich zum Auslösen der Schutzeinrichtungen führen.

3.2 RPSE (Erdschlusskompensation)

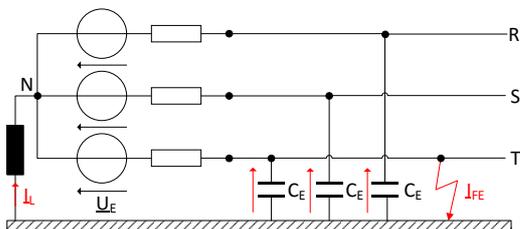


Abbildung 6: Netzbetrieb mit Petersenspule im Sternpunkt.

Bei der RSPE sollen die kapazitiven Erdschlussströme durch eine geeignete Drosselspule (Petersenspule) kompensiert werden (Abb. 6). Der Schwingkreis wird auf Netzfrequenz abgestimmt, so dass der induktive Strom I_L den kapazitiven Strom kompensiert. Der verbleibende Reststrom verlöscht dann von selbst [4]. Wie zuvor lässt sich ein einfaches ESB aus Abb. 6 ableiten:

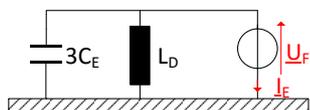


Abbildung 7: Finales ESB zur Bestimmung der Reaktanz der Spule.

Es muss gelten:

$$I_{FE} = I_{LD}$$

$$\frac{3U\omega C_E}{\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}\omega L}$$

Daraus lässt sich dann die Reaktanz der Spule bestimmen:

$$X_{LD} = \omega L_D = \frac{1}{3\omega C_E}$$

Die Resonanzabstimmung erfolgt abhängig von der Netztopologie (C_E ist veränderlich je nach Schaltzustand). Dies ist Aufgabe der Netzführung [4]. Die Petersenspulen müssen also verstellbar sein.

Weitere wichtige Parameter für die RSPE sind die sogenannte *Verstimmung* v und die *Dämpfung* d . v gibt das Verhältnis von Spulenstrom I_{LD} und Fehlerstrom I_{FE} an. Ist der Spulenstrom größer als der Fehlerstrom, spricht man von einer *Überkompensation*. Demzufolge bedeutet *Unterkompensation*, dass $I_{LD} < I_{FE}$ ist. Im üblichen Betrieb werden gelöschte Netze überkompensiert betrieben, um der Gefahr der Resonanz bei Ausfall oder Abschaltung einer Leitung zu entgehen (Abb. 8) [6]. Die Dämpfung ist ein Maß für den ohmschen Anteil des Reststroms [6].

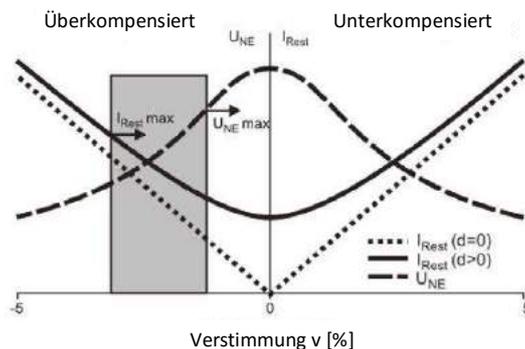


Abbildung 8: Verlagerungsspannung und Reststrom im Bereich der Über- und Unterkompensation (nach [6]).

Im erdschlusskompensierten Netz stellt sich eine Sternpunktverlagerungsspannung U_{NE} bereits im ungestörten Betrieb ein [6]. Dies ist ein weiterer Grund, warum Petersenspulen regelbar sein müssen (dies geschieht auch automatisch).

3.3 NOSPE

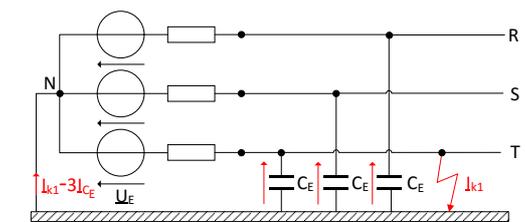


Abbildung 9: NOSPE, hier starr geerdet ohne Drosselspule (vgl. Abb. 1).

Bei der NOSPE wird der Sternpunkt entweder *starr* oder *niederohmig* (mit einer niederohmigen Drosselspule geerdet), vgl. Abb. 1 und 9. Ein Isolationsversagen führt bei dieser Betriebsart auf Grund der Verbindung zum Sternpunkt zu einem stromstarken einpoligen Kurzschluss oder Erdkurzschluss. Dieser Strom führt zu thermischen und mechanischen Beanspruchung der Betriebsmittel und muss durch Sicherungen (Netzschutz) über Leistungsschalter unterbrochen werden. Der Fehlerstrom kann über folgende Gleichung bestimmt werden:

$$I_{k1}'' = \frac{c\sqrt{3}U_n}{2Z_1 + Z_0}$$

Z_0 beschreibt die Impedanz des Nullsystems. Z_1 die des Mitsystems.

Der Strom kann mehrere kA annehmen. Dadurch können hohe Schrittspannungen am Fehlerort auftreten. Aus Sicht des Netzschutzes ist dies jedoch vorteilhaft, da so eine *selektive Erdschlusserfassung* möglich wird. Durch eine sogenannte *AWE* (automatische Wiedereinschaltung) oder *KU* (Kurzunterbrechung) können viele solcher Fehler behoben werden.

4 Kritische Würdigung

SPE ist kein neues Thema. Bereits gegen 1917 wurden erste Drosselspulen in Mittelspannungsnetzen eingesetzt [5]. Die SPE sorgt für eine bessere Versorgungssicherheit und ist für die Netzbetreiber aller Spannungsebenen unabdingbar. Durch die Veränderungen im Netzbereich (mehr Kabelstrecken, größere Ausdehnungen) muss das Thema SPE immer wieder neu aufgerollt werden. So ist es in der Vergangenheit schon vorgekommen, dass ganze Netze auf eine andere SPE umgestellt werden mussten.

5 Zusammenfassung/Fazit

Als Zusammenfassung sollen folgende Tabellen dienen, die auf die Vor- und Nachteile oder wichtige Parameter der jeweiligen SPE eingehen:

1. ISPE/OSPE

Vorteile	Nachteile
Einfache Ausführung	Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
Geringe Anforderungen an die Erdungsanlagen	Erhöhte Überspannungsbeanspruchung
	Keine sichere selektive Erdschlusserfassung

Tabelle 1: nach [6].

Verwendung in Netzen mit geringer Ausdehnung (Industriernetze, Kraftwerksnetze); Mittelspannung.

2. RSPE

Vorteile	Nachteile
Trotz einpoligem Fehler kann Netz weiterbetrieben werden	Begrenzung der Netzausdehnung durch Erdschlussreststrom
Erdschlüsse verlöschen meist von selbst	Dauererdschlüsse möglich, Gefahr von Mehrfacherdschlüssen
Geringere Anzahl an Abschaltungen => Versorgungssicherheit!	Mehraufwand durch Einbau und Regelung Petersenspule

Tabelle 2: nach [6].

Verwendung in Mittel- und Hochspannungsnetzen, abhängig vom Kabelanteil.

3. NOSPE

Vorteile	Nachteile
Einfache Ausführung	Hohe Erdkurzschlussströme
Einfache selektive Schutzerfassung, AWE möglich	Daher erheblicher Aufwand für Erdungsanlagen
Netzausdehnung nahezu unbegrenzt	Häufigere AWEs/KUs

Tabelle 3: nach [6].

Verwendung in Hoch- und HöS-Netzen größerer Ausdehnung; auch in Kabelnetzen.

4. Vergleich der Methoden

	ISPE	NOSPE	RSPE
Fehlerstrom	Kapazitiver-ES	I''_{k1} Erd-KS	I_{Rest} ES-Rest
Erdfehlerfaktor δ	$\sim \sqrt{3}$	$< 1,38$	$\sqrt{3} \dots 1,1\sqrt{3}$
Lichtbogenlöschung	Selbstlöschend	Nicht s.	Selbstlöschend
Folgefehler	Doppel-ES; Wiederzünden Lichtbogen	Keine	Doppel-ES
Berührungsspannung U_B	$\leq 65V$	lt. VDE 0141	$\leq 65V$

Tabelle 4: nach [5].

6 Literatur

- [1] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, Elektrische Energieversorgung, Hamburg: Vieweg+Teubner, 2010.
- [2] G. Funk, Der Kurzschluß im Drehstromnetz, München: R. Oldenbourg Verlag, 1962.
- [3] B. R. Oswald, Berechnung von Drehstromnetzen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [4] A. J. Schwab, Elektroenergiesysteme, Karlsruhe: Springer, 2012.
- [5] J. Schlabbach, Elektroenergieversorgung, Bielefeld: VDE-Verlag, 2003.
- [6] C. Obkircher, Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze, Graz: TU Graz (Dissertation), 2008.



Arten und Anwendung von Sternpunktterdung

18.01.2015

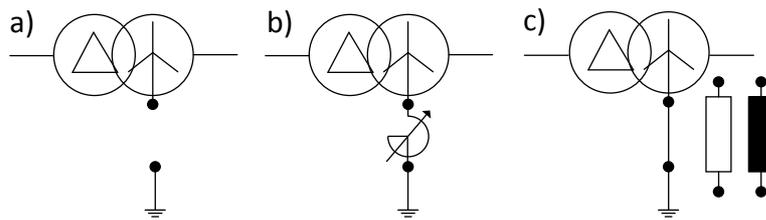
Erdkurzschluss
ISPEKNOSPE
Verstimmt? AWE
RSPE KU Erdschluss
OSPE
Löschgrenze
Wischer?

Agenda

1. Überblick
2. ISPE
3. RSPE
4. NOSPE
5. Vergleich
6. Ausblick

1. Überblick

Drei Arten der SPE



a) ISPE/OSPE (isoliert)

b) RSPE (Petersenspule)

c) niederohmig (oder starr)

(KNOSPE: Kurzzeitige NOSPE)

1. Überblick

Wieso SPE?

1. Schutz vor Betriebsmitteln
2. Schutz vor Personenschäden
3. Versorgungssicherheit

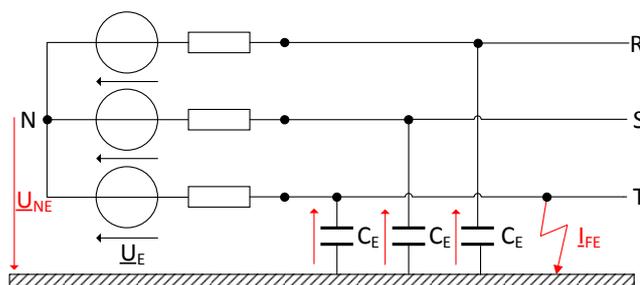
SPE: Strom oder Verlagerungsspannung sollen begrenzt werden!

SPE relevant im Fehlerfall

2. ISPE

Der einpolige Fehler:

Ein Beispiel:



Einfaches Netzmodell ohne Sternpunktterdung (OSPE/ISPE) mit Fehler in Phase T [4]

2. ISPE

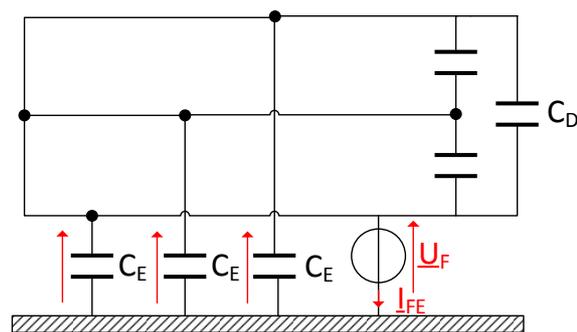
Gesucht: Fehlerstrom I_{FE}

1. Symmetrische Komponenten: Mit-, Gegen-, Nullsystem; Fehlerbedingungen usw.

2. Methode der Ersatzspannungsquelle [4]:

1. Treibende Spannung U_E durch Ersatz-SPQ $U_F = U_N / \sqrt{3}$ am Fehlerort
2. Treibende Quellenspannung der Einspeisung = 0
3. Vernachlässigen von Innenwiderstand der Quelle, Leitungsimpedanzen

2. ISPE



ESB nach Anwendung der Methode der Ersatz-SPQ, C_D : Durchgriffskapazität [4]

2. ISPE



ESB nach Vernachlässigung von C_D . Alle C_E parallel zur Ersatz-SPQ

2. ISPE

Berechne Betrag des Anfangs-Erdschlussstroms zu:

$$I_{FE} = \frac{U_N/\sqrt{3}}{\sqrt{R_{tot}^2 + X_{tot}^2}} \Rightarrow I_{FE} = \sqrt{3} U_n \omega C_E$$

Höhe des Fehlerstroms richtet sich also nach der Erdkapazität und der Nennspannung

Ausdehnung des Netzes!

2. ISPE

Wie hoch darf der Strom werden?

Löschgrenzen:

Definieren, bis zu welchem Strom ein Lichtbogen von selbst im Nulldurchgang verlöschen kann => Versorgungssicherheit

$$10\text{-}20\text{kV: } I_{FE_{max}} < 35\text{A}$$

$$60\text{kV: } I_{FE_{max}} < 60\text{A}$$

„Erdschlusswischer“



18.01.2016 | David Rakidzija | Arten und Anwendung von Sternpunktterdung | Seite 11



2. ISPE

Und die Spannung?

Erdfehlerfaktor:
$$\delta := \frac{U_{LE_{max}}}{U/\sqrt{3}}$$

Spannung der fehlerhaften Leitung bricht zusammen

=> Sternpunktverlagerung (Verlagerungsspannung)

=> „gesunde Leiter“ nehmen den $\delta = \sqrt{3}$ -fachen Wert an!



18.01.2016 | David Rakidzija | Arten und Anwendung von Sternpunktterdung | Seite 12

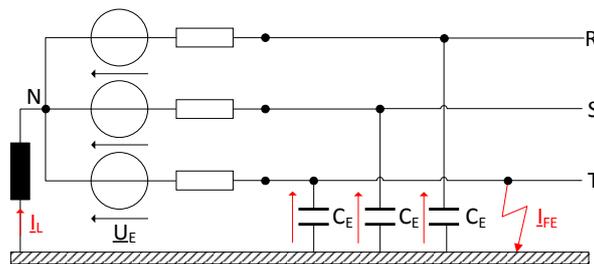


2. ISPE: Zusammenfassung

1. Erdschlussstrom abhängig von C_E
=> Erdschlussstrom steigt: Löschgrenze schnell erreicht!
2. Betriebsfrequente ($\sqrt{3}x$) und transiente Überspannungen (2,5x)
=> belasten Betriebsmittel, Gefahr Doppelerdschluss
3. Keine sichere selektive Erdschlusserfassung
4. Dafür einfache Ausführung
5. Geringe Anforderungen an Erdungsanlagen

3. RSPE

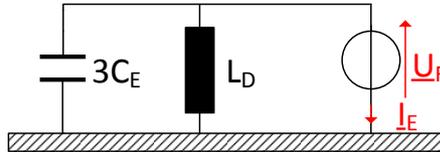
Der einpolige Fehler:



Einfaches Netzmodell mit *Petersenspule*
(Resonanzsternpunktterdung, Erdschlusslöschung, RSPE) mit Fehler in Phase T

3. RSPE

$$I_{FE} \stackrel{!}{=} I_{LD}$$



ESB nach Vernachlässigung von C_D . C_E und L_D parallel zur Ersatz-SPQ

3. RSPE

Dimensionierung der Petersenspule:

$$\frac{3U\omega C_E}{\sqrt{3}} = \frac{U}{\sqrt{3}\omega L} \Rightarrow X_{LD} = \omega L_D = \frac{1}{3\omega C_E}$$

Da C_E veränderbar ist (je nach Schaltzustand!) muss die Petersenspule verstellbar sein und durch die Netzführung eingestellt werden \Rightarrow auch automatisch.

3. RSPE

Kompensation nicht vollständig!

Verstimmung:
$$v := \frac{I_{C_E} - I_L}{I_{C_E}}$$

Verhältnis zwischen Spulenstrom und kapazitivem Erdschlussstrom

=> immer ein Reststrom an der Fehlerstelle

=> Reststrom darf Löschgrenze nicht überschreiten

=> Üblicherweise überkompensiert: Gefahr von Resonanz bei z.B. Ausfall einer Leitung

3. RSPE

Verstimmung:

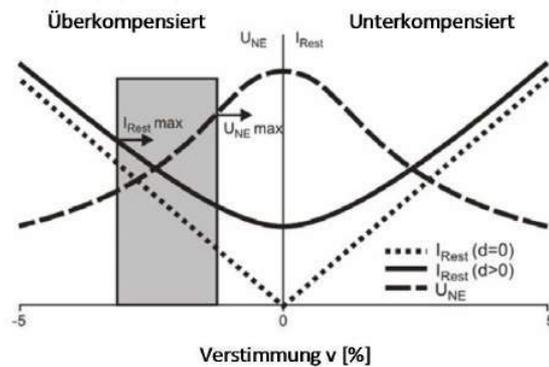


Abb. [6]

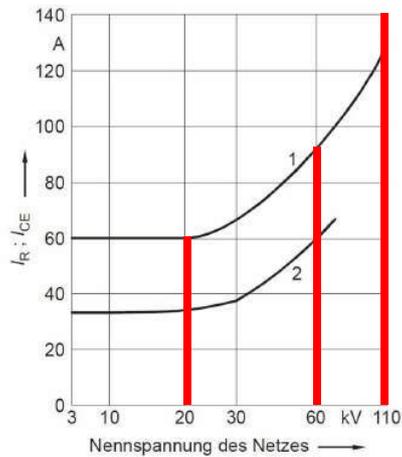
1. I_{rest} wird nie Null!
2. Grauer Bereich Kompromiss aus I_{rest} und U_{NE} !

3. RSPE

Wie hoch darf der Strom werden?

Löschgrenze:

1. RSPE
2. ISPE



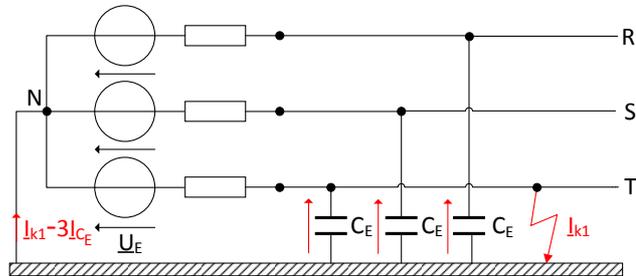
(nach VDE 0228)

3. RSPE: Zusammenfassung

1. Trotz größerer Netzausdehnung Strombegrenzung unterhalb Löschgrenze!
 - => Lichtbogen kann selbst verlöschen
 - => Bei Dauererdschluss Weiterbetrieb bis 2h
2. Geringe Anzahl an Abschaltungen => Versorgungssicherheit
3. Begrenzung der Netzausdehnung durch I_{rest} !
4. Hoher Kabelanteil: keine Löschung des Lichtbogens (nicht selbstheilende Isolation)
5. Mehraufwand durch Einbau und Regelung der Petersenspulen
6. Auf Grund höherer Ströme evt. Gefährdung von Personen an der Fehlerstelle (Berührungsspannung, Schrittspannung)

4. NOSPE

Einpoliger Kurzschluss/Erdkurzschluss.



Einfaches Netzmodell mit *starr (widerstandslos) oder niederohmiger SPE*
(mit Fehler in Phase T)

4. NOSPE: Zusammenfassung

1. Einfache Ausführung
2. Einfache selektive Schutzerfassung auf Grund höherer Ströme
=> AWE (automatische Wiedereinschaltung) / KU (Kurzunterbrechung)
3. Netzausdehnung praktisch unbegrenzt
4. Reduzierung transienter Überspannungen, geringe Verlagerungsspannung
5. Verminderter Isolationspegel bei starrer Erdung ausreichend, Vermeidung von Doppelerdschlüssen
6. Großer Aufwand bei Erdungsanlagen und Mehraufwand Netzschutz
7. Häufigere Abschaltungen (KU) von Leitungen

5. Vergleich [6]

	ISPE	RSPE	NOSPE
Fehlerstrom	Kapazitiver-ES	I_{Rest} Erdschluss	I''_{k1} Erd-KS/KS
Erdfehlerfaktor δ	$\sim \sqrt{3}$	$\sqrt{3} \dots 1,1\sqrt{3}$	< 1,38
Lichtbogen- Löschung	Selbstlöschend	meist selbstlöschend	Nicht s. AWE!
Folgefehler	Doppelerdschluss, Wiederzünden Lichtbogen	Doppelerdschluss	Keine
Verbreitung	Netze geringer Ausdehnung (Industriernetze), MS	Freileitung mit Kabelanteile MS und HS bis 110kV	Kabelnetze bis 110kV, HÖS (starr)

6. Ausblick

Alte Idee, aber immer noch wichtig für die Energieversorgung!

Durch Änderungen in der Netztopologie (vermehrter Kabelausbau!) bedarf es einer Anpassung der SPE

SPE ist immer ein Kompromiss aus Strom oder Spannung

SPE selbst bestimmt den Fehler



Petersenspule, 1917 im Netz der Kraftwerk Altwürttemberg A.-G. [4]

Ende

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Literatur

- [1] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, Elektrische Energieversorgung, Hamburg: Vieweg+Teubner, 2010
- [2] G. Funk, Der Kurzschluß im Drehstromnetz, München: R. Oldenbourg Verlag, 1962
- [3] B. R. Oswald, Berechnung von Drehstromnetzen, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- [4] A. J. Schwab, Elektroenergiesysteme, Karlsruhe: Springer, 2012.
- [5] J. Schlabbach, Elektroenergieversorgung, Bielefeld: VDE-Verlag, 2003
- [6] C. Obkircher, Ausbaugrenzen gelöschter betriebener Netze, Graz: TU Graz (Dissertation), 2008

Elsbergs “Blackout”: Nur Hollywood oder mögliche Realität?

Elsbergs “Blackout”: Only Hollywood or possible reality?

Daniel Kaufmann, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, Braunschweig, d.kaufmann@tu-bs.de

Kurzfassung

Die stärkere Vernetzung der Energienetze und die daraus resultierende Anfälligkeit macht diese für Terrorangriffe zu einem potentiellen Ziel. Die Folgen eines großflächigen und lang andauernden Stromausfalls werden sehr treffend beschrieben. Die Umstände, die zum Stromausfall geführt haben, sind durchaus möglich, aber der geschilderte Umfang ist eher unrealistisch. Das Szenario der Folgen eines Stromausfalls im Buch “Blackout – Morgen ist es zu spät” waren durchaus realistisch.

Abstract

The increased combine of energy networks and the resulting vulnerability makes this for a potential target for terrorist attacks. The consequences of a large-scale and long-lasting power outage were described very exactly. The circumstances that led to the power failure are quite possible, but the described scope is rather unrealistic. The scenario of the consequences of a power failure in the book "Blackout - Tomorrow it will be too late" were quite realistic.

1 Einleitung

Infolge der Globalisierung und des wirtschaftlichen Zusammenwachsens der Nationalstaaten zu einem Wirtschaftsraum kam es im Bereich der Energieversorgung und –übertragung zur Bildung von großen Verbundnetzen. Durch die Energiewende und die daraus resultierende verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien, wie Wind und Sonne, kam es zur einer Dezentralisierung der Energiegewinnung. Dies macht es erforderlich, dass Energie über weite Strecken transportiert werden muss.

Der größte Vorteil von Verbundnetzen ist die Sicherstellung einer konstanten Versorgung bei Ausfall einzelner Kraftwerke und das immer genügend Reserveleistung zur Verfügung steht. Dadurch können Betriebskosten gesenkt werden.

Nachteile der engen Verbundenheit der Netze ist es, dass Störungen sich auf das ganze Netz ausbreiten können.

Beispielhaft sei hier der Stromausfall vom 4. November 2006 erwähnt. Aufgrund der Überführung eines Schiffes und der daher erfolgten Abschaltung einer Hochspannungsleitung, kam es durch eine Fehlberechnung zu einem großflächigen und mehrstündigen Stromausfall in ganz Europa, von dem mehr als 10 Millionen Menschen betroffen waren. [2,3]

Dies zeigt, dass lokale Störungen sich im gesamten Netz ausbreiten können.

Das Buch von Marc Elsberg “Blackout – Morgen ist es zu spät” beschäftigt sich mit einem großflächigen Stromausfall in ganz Europa infolge eines Terrorangriffes und den sich daraus ergebenden Folgen. [1]

Ziel der Arbeit ist es festzustellen, ob dieses Szenario realistisch ist.

2 Theoretische Grundlagen



Bild 1 Netzstruktur in Europa [4]

Wie in **Bild 1** zu sehen, ist das Europäische Energienetz in mehrere frequenzunabhängige Verbundnetzte geteilt. Die skandinavischen Länder Norwegen, Schweden und Finnland bilden das Verbundnetz NORDEL. Großbritannien ist im UKTSOA. Beide Verbundnetze sind aus technischen Gründen durch Seekabel und Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) an das kontinentaleuropäische UCTE-Netz angebunden. Grundlage für ein funktionierendes Verbundnetz ist, dass alle Erzeuger in diesem Netz mit gleicher Phasenlage und Netzfrequenz betrieben werden. Voraussetzung für eine konstante Netzfrequenz ist, dass benötigte und eingespeiste Leistung gleich groß sind. Abweichungen zwischen Verbrauch und Erzeugung sind unvermeidbar und führen zur Notwendigkeit einer aktiven Regelung zur Frequenzstabilität. Als positive Regelenergie bezeichnet man hierbei bei zu niedriger Netzfrequenz die zusätzliche Einspeisung oder Reduktion der Netzlast. Negative

Regelenergie bedeutet die Reduktion der Einspeisung oder Erhöhung der Netzlast bei zu hoher Netzfrequenz.[4] Ein intelligenter Stromzähler, sogenannte Smart Meter, liefern genaue Angaben über den aktuellen Verbrauch direkt an die Energieversorger und erlauben so eine genauere Anpassung von Leistung und Verbrauch. Des Weiteren erlauben sie eine Fernsteuerung zur Zu- und Abschaltung von Verbrauchern.

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Zu Beginn meiner Arbeit stand die gründliche Auseinandersetzung mit dem Buch von Marc Elsberg.

In dem Roman „Blackout morgen ist es zu spät“ wird die Geschichte eines Hackerangriffes auf das europäische Energienetz erzählt. Infolge des Angriffes kommt es zu einem flächendeckenden und langandauernden Stromausfall in ganz Europa.

Der Roman beginnt damit, dass die Hauptfigur Piero Manzano einen Autounfall hat, weil die Ampeln in Mailand ausgefallen sind. Nachdem er das Krankenhaus verlassen hat und in seiner Wohnung ist, stellt er auf seinem Smart Meter einen merkwürdigen Befehl fest. Es stellt sich heraus, dass dies ein Disconnect-Befehl ist und in Manzano macht sich der Verdacht breit, dass es sich nicht um einen gewöhnlichen Stromausfall handelt, sondern um einen gezielten Angriff auf das Energienetz.

Nach einigen Nachforschungen erhärtet sich sein anfänglicher Verdacht, da nicht nur Italien vom Stromausfall betroffen ist. In ganz Europa kommt es zu Problemen der Stromversorgung und immer mehr Bereiche fallen aus. Mit seinem Verdacht versucht er die italienischen Behörden zu warnen. Diese halten ihn für einen Spinner und glauben ihm seine Geschichte nicht. Zwischenzeitlich breitet sich der Stromausfall über ganz Europa aus.

Nach diesem Rückschlag gelingt es ihm jedoch durch persönliche Kontakte, Europol zu informieren. Durch diese Zusammenarbeit fühlen sich die Hacker bedroht und schleusen Manzano eine E-Mail auf seinen Laptop, wodurch die Behörden glauben, dass Manzano mit den Hackern zusammenarbeitet. Nach Verhaftung und abenteuerlicher Flucht gelingt es Manzano schließlich, seine Unschuld zu beweisen. Nach einigem Hin und Her schaffen es die europäischen Behörden, den Hackern auf die Spur zu kommen. Zum Ende des Buches werden in einem großen Showdown die Terroristen gestellt und es gelingt den Behörden die Stromversorgung wiederherzustellen.

Nach dem 23-tägigen Stromausfall werden die Ausmaße des Stromausfalles erst sichtbar. In dem Kernkraftwerk Saint-Laurent kam es zu einer Kernschmelze, wodurch die Region unbewohnbar wurde. Darüber hinaus sind weitere Landstriche durch Unfälle zerstört oder nicht mehr bewohnbar. Die Opferzahlen gehen in die Millionenhöhe. In Spanien, Griechenland und Portugal kam es zu Putschen durch das Militär. [1]

3.1 Chronologie des Stromausfalles

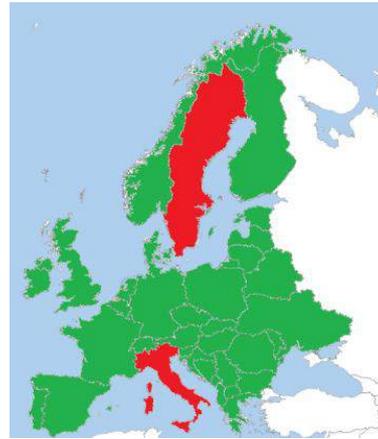


Bild 2 Beginn des Stromausfalles

Die in dem **Bild 2** rot markierten Länder Schweden und Italien stellen die Ausgangspunkte des Stromausfalles dar aufgrund der dort schon flächendeckenden Einführung von Smart Metern. Durch die Ausfälle in Schweden fällt auch die Stromversorgung in den Nachbarländern Norwegen und Finnland aus. Im Süden gelingt es nicht Italien zu isolieren, wodurch auch die Schweiz ausfällt. In Frankreich, Österreich, Slowenien, Rumänien, Ungarn, Tschechien, Polen, Großbritannien und Dänemark haben mittlerweile Probleme ihre Stromversorgung aufrecht zu erhalten. Es gelingt nicht die betroffenen Gebieten abzutrennen. Innerhalb von 45 Minuten nach den ersten Ausfällen und Problemen kommt es in ganz Europa, bis auf Teile von Großbritannien und der Iberischen Halbinsel, zu Totalausfällen. Einige Zeit später ist der gesamte europäische Kontinent betroffen.

Versuche das Stromnetz wiederherzustellen scheitern, weil nicht nur die Smart Meter gehackt wurden, sondern auch die Steuerung der Kraftwerke und gezielt Strommasten und Umspannwerke beschädigt wurden. [1]

4 Kritische Würdigung

Die Reihenfolge des Stromausfalles, so wie im Buch geschildert, ist durchaus realistisch.

Der Beginn des Ausfalls in den Ländern Italien und Schweden ist plausibel. Beide Länder waren zurzeit der Entstehung des Buches flächendeckend mit Smart Metern versorgt, wodurch die gezielte Zu- und Abschaltung von Verbrauchern möglich wäre. 2014 gelang es Sicherheitsforschern in Spanien mittels eines gehackten Smart Meters Fabrikate des gleichen Herstellers über ein Netzwerk zu infizieren. So ließen sich durch das Netzwerk strikt getrennte Geräte miteinander verbinden.[6]

Für die zukünftige Entwicklung, aufgrund der Planung der flächendeckenden Einführung von Smart Metern, ist es deshalb zwingend erforderlich, dass solche Sicherheitslücken behoben werden und eine Manipulation von außen ausgeschlossen werden kann.

Kettenreaktionen, die sich bei einem lokalen Stromausfall großräumig ausbreiten, haben sich bereits 2006 gezeigt. Wegen einer Schiffsüberführung über die Ems kam es zu einem weitreichenden Stromausfall. Neben Deutschland waren auch Frankreich, Belgien, Italien, Österreich und Spanien betroffen. Durch die Abschaltung einer Hochspannungsleitung und einer schlechten Absprache der Netzbetreiber kam es zur Auftrennung des UCTE-Netzes in 3 Bereiche (siehe **Bild 3**).

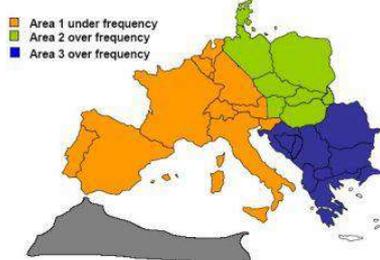


Bild 3 Netzauftrennung in Europa [3]

Erst nach ca. zwei Stunden gelang es, das UCTE-Netz wieder vollständig zu synchronisieren. [2,3]

Aus dem Bericht zur Lage der IT-Sicherheit in Deutschland wurden 2014 mehrere Fälle von Hackerangriffen auf Industrieanlagen bekannt.

Bei einem Fall wurden deutsche Industrieanlagen, darunter auch Kraftwerke, durch die Hackergruppe „Dragonfly“ erfolgreich angegriffen und die Steuerungssoftware manipuliert. Dabei nutzte die Gruppe das Schadprogramm „Havex“. Da ein direkter Zugriff auf die Steuerungssysteme nicht möglich war, griffen die Hacker die Hersteller der Software für Industriesteuerungssysteme an. Sie hängten der legitimen Software das Schadprogramm an, wodurch sich die Kunden unbemerkt dieses Virus in ihre Systeme luden.

In einem weiteren Fall wurde ein Hochofen eines deutschen Stahlwerkes durch Kompromittieren der Steuerung, wodurch ein geregeltes Herunterfahren nicht mehr möglich war, massiv beschädigt. [5]

Der Stromausfall am 23.12.2015 in der Ukraine ist womöglich durch Hacker verursacht worden. Darüber hinaus wurden ebenfalls im Dezember 2015 sensible Daten eines der größten Stromerzeugers der USA gestohlen, womit ein Stromausfall hätte verursacht werden können. [8]

Größte Schwachstelle bei den meisten Vorfällen war die Nichteinhaltung der IT-Compliance. Viele Angriffe erfolgten durch Social Engineering. Dadurch wird es für die Zukunft wichtig, neben weiteren technischen Sicherungsmaßnahmen auch das Personal gezielt auf solche Angriffe zu schulen und zu sensibilisieren.

5 Zusammenfassung/Fazit

Das Szenario eines Stromausfalls durch einen Hackerangriff ist möglich. Die Folgen eines langen und andauernden Stromausfalls wären verheerend für unsere Gesellschaft. Das Büro für Technikfolgenabschätzung

beim Deutschen Bundestag (TAB) hat dies in einem Bericht 2010 dargelegt. [7]

Daher ist es zwingend erforderlich, die Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz der Energieanlagen zu verbessern. Neben der Funktionalität müssen auch die Schutzmaßnahmen mehr in den Mittelpunkt der Forschung rücken. Ein weiterer Aspekt, auf den das Augenmerk gelegt werden muss, ist der Bereich des Katastrophenmanagement. Im Falle eines langandauernden Stromausfalls müssen die zuständigen Stellen personell und materialmäßig ausreichend ausgestattet sein. Die Aufrechterhaltung der Kommunikation zwischen den Krisenstäben und der Bevölkerung muss sichergestellt werden.

6 Literatur

- [1] M. Elsberg, Blackout – Morgen ist es zu spät, Taschenbuch Blanvalet Verlag, 2013.
- [2] Bundesnetzagentur „Pressekonferenz – Stromausfall“ 17. November 2006. [Online]. Available: http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Reden/2006/StromausfallNov06Kurth061117Id7966pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=2. [Zugriff am 20.01.2016].
- [3] Verband der Elektrotechnik „Beschreibung des Stromausfalls in Westeuropa“ 14. November 2006. [Online]. Available: <https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Publikationen/Rundbriefe/2007-oeffentlich/mi-1/Technik-Trends/2006-exklusiv/Seiten/Stromausfall-2006-11.aspx> [Zugriff am 20.01.2016].
- [4] Amprion GmbH [Online]. Available: <http://www.amprion.net/ucte-verbund-verbundnetz-regelzonen> [Zugriff am 20.01.2016].
- [5] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik „Die Lage der IT-Sicherheit“ 2014. [Online]. Available: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2014.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am 20.01.2016].
- [6] Black Hat „Sicherheitskonferenz“ 2014 [Online]. Available: <https://www.blackhat.com/eu-14/briefings.html#lights-off-the-darkness-of-the-smart-meters> [Zugriff am 20.01.2016].
- [7] Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag „Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung“ 2010. [Online]. Available: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab141.pdf> [Zugriff am 20.01.2016].
- [8] Frankfurter Allgemeine Zeitung „Die Häckerdämmerung“ 11 Januar 2016. [Online]. Available: <http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/ukrainischer-stromausfall-war-ein-hacker-angriff-14005472.html> [Zugriff am 20.01.2016].



Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität?

Daniel Kaufmann, 20.01.2016

Agenda

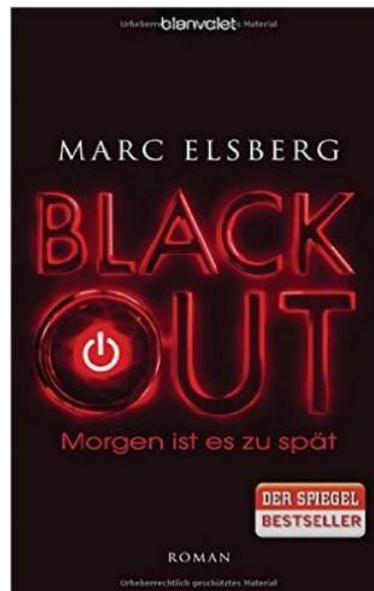
- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung

Einleitung

- Untersuchung der Plausibilität des im Roman „Blackout Morgen ist es zu spät“ geschilderten Szenarios eines Terrorangriffs auf das europäische Energienetz und der damit verbundenen Konsequenzen
- Die Motivation dieser Arbeit ist die Untersuchung der möglichen Anfälligkeit großflächiger Verbundnetze aufgrund ihrer Bedeutung für unsere moderne Gesellschaft



www.amazon.de

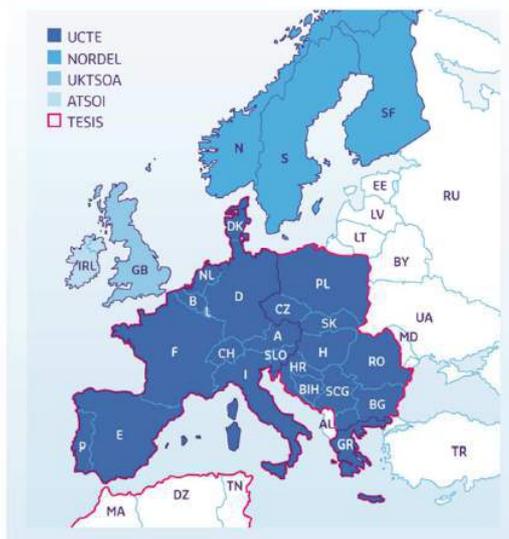
Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung

Theoretische Grundlagen

- Von zunächst regionaler Versorgung ging die Entwicklung zu immer größeren Verbundnetzen
- Die Grafik zeigt das derzeitige europäische Verbundnetz, bestehend aus den Netzen UCTE, NORDEL, UKTSOA, ATSOI
- Das NORDEL-Netz, zu dem die Länder Norwegen, Schweden und Finnland gehören, ist aus technischen Gründen nicht zum UCTE-Netz synchronisiert. Das gleiche gilt für die restlichen Netze
- Der Stromtransfer erfolgt zwischen den verschiedenen Netzen wegen der Seekabel mittels Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)

Verbundnetz



www.amperion.net

Theoretische Grundlagen

- Damit ein Verbundnetz funktionsfähig ist, müssen alle Erzeuger mit gleicher Netzfrequenz und Phasenlage arbeiten
- **Vorteile** von Verbundnetzen:
 - Redundanz einzelner Kraftwerke
 - Höhere Versorgungssicherheit
 - Wirtschaftlichere Auslastung
- **Nachteile** und **Risiken** von Verbundnetzen
 - Lokale Störungen können sich auf das gesamte Netz ausbreiten
 - Erhöhung der Vulnerabilität der Netze durch Sabotage
 - Attraktives Ziel für terroristische Aktivitäten

Theoretische Grundlagen

- Smart Meter sind intelligente Stromzähler, die den aktuellen Verbrauch direkt an die Energieversorger liefern
- Datenaustausch erfolgt mittels Telefon oder Internet
- Genauere Anpassung von Leistung und Verbrauch möglich
- Erlauben einer Fernsteuerung zur Zu- und Abschaltung von Verbrauchern



www.stadtwerkchassfurt.de/smartmeter

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung



20.01.2016 | Daniel Kaufmann | Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität? | Seite 9



Vorstellung Buch

- In dem Roman „Blackout Morgen ist es zu spät“ von Marc Elsberg wird die Geschichte eines europaweiten Stromausfalls aufgrund eines Hackerangriffes erzählt
- Bedingt durch die starke Vernetzung wirkt sich der Stromausfall, der in Italien und Schweden beginnt, aufgrund der dort schon flächendeckenden Einführung von Smart Metern (Fernab und -zuschaltung), letztlich auf das gesamte europäische Verbundnetz aus
- Des Weiteren thematisiert das Buch die Folgen eines langen und großflächigen Stromausfalls auf das Leben der Menschen und die Wirtschaft
 - Unfälle in Fabrikanlagen und im Straßenverkehr
 - Politische Auswirkungen bis hin zu Putsch des Militärs in Spanien, Griechenland und Portugal
 - Engpässe in der Lebensmittelversorgung und Wasserversorgung



20.01.2016 | Daniel Kaufmann | Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität? | Seite 10



Vorstellung Buch

- Der italienische Informatiker Pierro Manzano entdeckt nach einem Stromausfall auf seinem Smart Meter einen Disconnect-Befehl. Dadurch stellt sich bei ihm der Verdacht ein, dass dies kein gewöhnlicher Stromausfall ist, sondern ein Hackerangriff auf die Stromversorgung. Durch seine weiteren Nachforschungen verstärkt sich dieser Verdacht, da nicht nur Italien, sondern große Teile Europas betroffen sind
- Die italienischen Behörden glauben ihm nicht und unterstellen ihm sogar verrückt zu sein. Allerdings gelingt es ihm durch Beziehungen Europol zu informieren. Nach anfänglicher Zusammenarbeit schaffen es die Hacker Manzano zu diskreditieren, indem sie ihm eine gefälschte Email auf seinen Laptop schleusen. Nach einigem Hin und Her schafft es Manzano jedoch, seine Unschuld zu beweisen und die Behörden in Europa kommen den Hackern schließlich auf die Spur.
- Nachdem der Strom wieder größtenteils hergestellt ist, werden die Schäden, die durch den Ausfall entstanden sind, erst sichtbar. Nach nur 23 Tagen ohne Strom sind weite Landteile durch Kernschmelzen oder Unfälle in Chemiefabriken unbewohnbar. Die Opferzahlen gehen in die Millionenhöhe.

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung

Chronologie des Stromausfalls

■ Grün : keine Störung

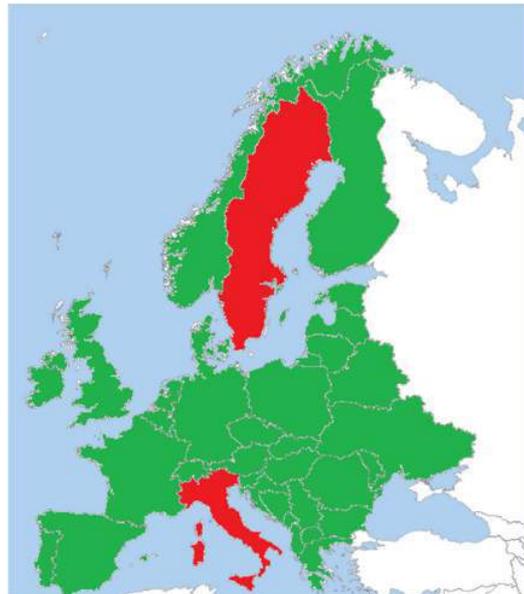
■ Gelb : Probleme

■ Rot : Ausfall



Chronologie des Stromausfalls

- Beginn der Ausfälle in Schweden und Italien durch gehackte Smart Meter
- Im Verlauf des Angriffes fallen immer weitere Teile der Länder aus, bis letztlich ganz Italien und Schweden betroffen sind.



Chronologie des Stromausfalls

- Durch die massiven Ausfälle in Schweden fallen die Nachbarländer Norwegen und Finnland im Norden aus
- Im Süden fällt nach Italien die Schweiz aus
- Frankreich, Österreich, Slowenien, Rumänien, Ungarn, Tschechien, Polen, Großbritannien und Dänemark haben mittlerweile Probleme ihre Stromversorgung aufrecht zu erhalten



Chronologie des Stromausfalls

- Es wird versucht die betroffene Gebiete abzutrennen. Dies gelingt jedoch nicht.
- Innerhalb von 45 Minuten nach den ersten Ausfällen und Problemen kommt es in ganz Europa, bis auf Teile von Großbritannien und der Iberischen Halbinsel, zu Totalausfällen



Chronologie des Stromausfalls

- Einige Zeit später ist der gesamte europäische Kontinent betroffen.
- Versuche das Stromnetz wiederherzustellen scheitern, weil die Steuerung der Kraftwerke gehackt wurde und somit keine Synchronisierung möglich ist
- Infolge des andauernden Stromausfalles kommt es zu einer Kernschmelze im Kernkraftwerk Saint-Laurent in Frankreich

Kernkraftwerk Saint-Laurent



Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung

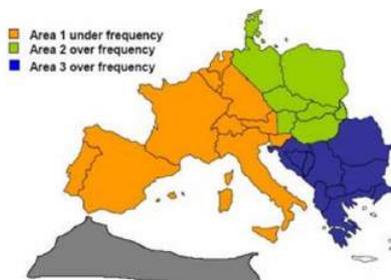
Plausibilität

Ist die Reihenfolge und das Ausmaß des Stromausfalls so, wie im Buch geschildert, realistisch?

- Der Beginn des Ausfalls in den Ländern Italien und Schweden ist durchaus plausibel. Beide Länder waren zur Zeit der Entstehung des Buches flächendeckend mit Smart Metern versorgt, wodurch die gezielte Zu- und Abschaltung von Verbrauchern möglich wäre.
- 2014 gelang es Sicherheitsforschern in Spanien mittels eines gehackten Smart Meters Fabrikate des gleichen Herstellers über ein Netzwerk zu infizieren. So ließen sich durch das Netzwerk strikt getrennte Geräte miteinander verbinden. Dies geschah jedoch nicht im Stromnetzwerk.
- Das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat in einem Bericht 2010 dargelegt, dass das Ausmaß der Folgen eines langen und andauernden Stromausfalls verheerend für unsere Gesellschaft wären.

Plausibilität

- Die Kettenreaktion bei einem Stromausfall hat sich bereits 2006 gezeigt. Damals wurden Hochspannungsleitungen in Deutschland wegen einer Schiffsüberführung über die Ems abgeschaltet, wodurch es zu Stromausfällen in etlichen europäischen Ländern kam. Betroffen waren neben Deutschland, Frankreich, Belgien, Italien, Österreich und Spanien. Die Störung hat zwei Stunden gedauert.
- Damals zerfiel das UCTE-Netz in drei Teilnetzte die erst nach zwei Stunden wieder synchronisiert werden konnten.



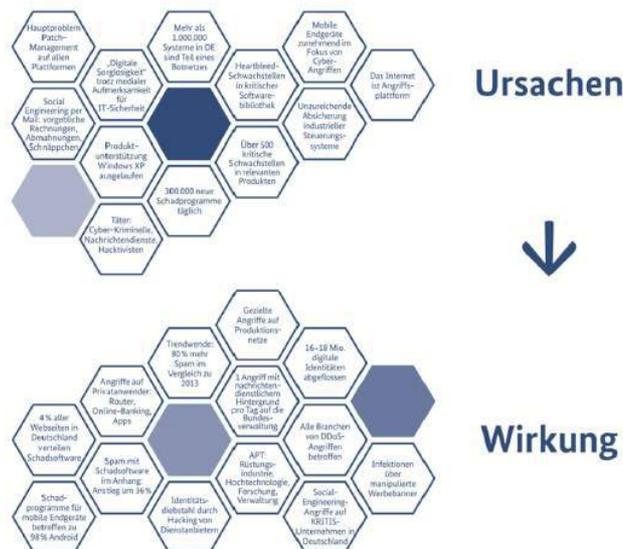
www.vde.com

Plausibilität

Ist ein solch gravierender Ausfall der Stromversorgung innerhalb Europas aufgrund eines Hackerangriffs möglich? Ist die Steuerung von Kraftwerken durch Hackerangriffe störanfällig?

- Es gab bereits 2013 durch die Hackergruppe „Dragonfly“ erfolgreiche Angriffe auf die Steuerungssoftware von Kraftwerken. Dabei nutzte die Gruppe die Update-Server der Hersteller von Steuerungssoftware aus. Sie tauschten Updates gegen infizierte Versionen aus. Der Angriff diente zuerst nur der Informationsbeschaffung.
- Aus einem Bericht zur Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2014 wurde ein Fall bekannt, indem ein Hochofen eines deutschen Stahlwerks massiv beschädigt wurde, indem Hacker die Steuerung lahmgelegt hatten und somit ein geregeltes Herunterfahren nicht mehr möglich war.
- Vermutlich ist der Stromausfall am 23. Dezember 2015 in der Ukraine durch einen Hackerangriff ausgelöst worden. Ebenfalls im Dezember wurde in den Vereinigten Staaten von Amerika einer der größten Stromerzeuger des Landes gehackt und sensible Daten, mit denen man einen Stromausfall verursachen könnte, erbeutet.

Plausibilität



www.bsi.bund.de → IT-Lagebericht

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Vorstellung Buch
- Chronologie des Stromausfalls
- Plausibilität
- Zusammenfassung



20.01.2016 | Daniel Kaufmann | Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität? | Seite 23



Zusammenfassung

- Das Szenario eines großflächigen Stromausfalls durch einen Hackerangriff und der daraus resultierenden Folgen ist durchaus realistisch. Nach Zeitungsberichten in der Zeitung „Die Welt“ vom 1. Juli 2014 „Hacker infizieren Schaltzentralen der Stromnetze“ und der „FAZ“ vom 17. Januar 2016 „Die Hackerdämmerung“ hat die Wirklichkeit die Fiktion bereits eingeholt.
 - Nur Hollywood oder mögliche Realität? → Die Ereignisse und Entwicklungen zeigen, dass die Romanerzählung realistisch sein könnte.
- Schutz der Systeme gegen Angriffe von außerhalb
- Bessere Vorbereitung auf Stromausfälle (Katastrophenmanagement)



20.01.2016 | Daniel Kaufmann | Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität? | Seite 24





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



20.01.2016 | Daniel Kaufmann | Elsbergs „Blackout“ : Nur Hollywood oder mögliche Realität? | Seite 25



Energiemanagement in Industrie und Haushalt

Energy management in Industry and Households

Götz-Nikolaus Grobelny, Braunschweig, goetz.grobelny@web.de

Kurzfassung

Ein Energiemanagement kann viele Vorteile mit sich ziehen. Nicht nur in der Industrie kommt es zum Einsatz, sondern wird mehr und mehr in die Haushalte Deutschlands integriert. Das Energiemanagement kann nicht mit einer reinen Steigerung der Energieeffizienz gleichgesetzt werden, sondern ist die vorausschauende, organisierte und systematisierte Koordinierung von Beschaffung, Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie. In diesem Beitrag wird gezeigt, inwiefern sich Energiemanagement sowie ökologisch als auch ökonomisch lohnt und mit welchen technischen Hilfsmitteln es umgesetzt wird.[1]

Abstract

Energy management can cause quite a few advantages. It gets integrated in the industry as well as in households. Energy management is not just an increase of efficiency it's more like a foresighted, organised and systemised coordination of procuring, altering, distributing and using of energy. This article will show how an energy management can be worth it in terms of ecology and economy and how its getting implemented technically.[1]

1 Einleitung

In der heutigen Zeit ist der richtige Umgang mit der immer steigenden Energienachfrage und damit verbundenen Erhöhung der Energiekosten, sehr wichtig, um nachhaltig und zukunftssicher zu leben. Dieses beinhaltet regelkonforme Maßnahmen zur Einsparung unnötig verbrauchter Energie in der Industrie sowie im Haushalt. Es ist eine zentrale Herausforderung und die Politik definierte das Ziel bis 2050 80% den CO₂ Ausstoß zu verringern.[2] Energiemanagement ist eine entscheidene Möglichkeit zur Erreichung dieses Ziels. Die Vorteile und die Art der Umsetzung eines ENMS sind unterschiedlich zwischen Haushalt und Industrie.

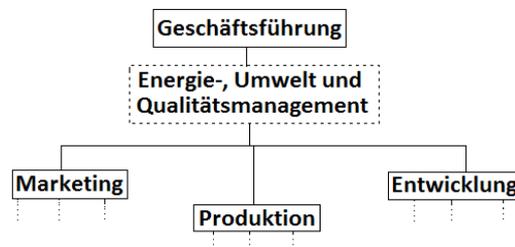
2 Grundlagen

Unter einem Energiemanagementsystem ist die Gesamtheit von miteinander zusammenhängenden oder in Wechselwirkung zueinander stehenden Elementen einer Organisation zu verstehen. Es wird zur Erstellung einer Energiepolitik sowie strategischer Ziele und zur Erreichung dieser Ziele verwendet. Es ist also eine Optimierung des Energieverbrauchs. Für ein umfangreiches Energiemanagement ist es unerlässlich den genauen Energiehaushalt regelmäßig zu erfassen und zu analysieren. Mit Hilfe der PDCA-Methode (PLAN-DO-CHECK-ACT) werden kontinuierliche Verbesserungen erreicht. Diese Vorgänge übernehmen meist vollautomatische Systeme, welche Daten über den Energieverbrauch von Heizung, Maschinen, Pumpen usw. protokollieren, verarbeiten und oft auch die intelligente Steuerung dieser Verbraucher ermöglichen[3]. In Folge dessen werden also durch verschiedenste Maßnahmen die Effizienz der Energienutzung gesteigert, um somit Energiekosten zu senken.

3 Hauptteil

3.1 Energiemanagement in der Industrie

Für eine stetige Auseinandersetzung ist es generell wichtig, dass das Energiemanagement fest in das Unternehmen zu integrieren. Hierarchisch befindet es sich zwischen Geschäftsleitung und Entwicklung, sowie Marketing und Produktion.



[1] Simon Hirzel, Benjamin Sonntag, Dr. Clemens Rohde, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Betriebliches Energiemanagement in der industriellen Produktion, 15. September 2011, www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/effizienzfabrik/Kurzstudie_Energiemanagement.pdf [Zugriff am 17.1.16].

[2] Bundesregierung, Energiewende und Klimawandel www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/6_energiewende-klimawandel/_node.html [Zugriff am 5.1.16].

[3] Franz Breitwieser, Fronius, Energiemanagement, 07/13, www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-C5C204B7-42CCA02E/fronius_international/SE_TA_Energy_Management_DE_325858_snapshot.pdf [Zugriff am 21.12.15].

In einem Großunternehmen wird ein separates Team gegründet, welches sich ausschließlich mit dem Thema Energiemanagement beschäftigt, wohingegen es in einem Kleinunternehmen eher eine Teilaufgabe einer Führungsperson ist.

Für ein Unternehmen bedeutet ein gut integriertes Energiemanagementsystem Steuervorteile (Rückerstattung der EEG Umlage und der Ökosteuer) und damit verbundene Kosteneinsparungen, Risikominimierung gegen schwankende Energiepreise, steigende Wettbewerbsfähigkeit oder auch die Verbesserung des Images. Sogar die Produktqualität soll sich erfahrungsgemäß erhöhen. [4] Am Beispiel VW's wird die Wichtigkeit sauberer Produkte besonders hervorgehoben. Schon 1996 hat VW Umweltmanagement betrieben und der Standort in Braunschweig bekam 2010 als erstes Unternehmen der Welt das Zertifikat vom TÜV Nord für die Erfüllung aller nötiger Vorgaben der DIN EN 16001. [5] In welchem Bereich sich Kosten reduzieren lassen, zeigt folgende Tabelle:

Bereich	Maßnahme	Ersparnis
Beleuchtung	Effizientere, besser positionierte Lampen	70%
Heizkosten	Solarthermie nutzen, Blockheizkraftwerke	30%
Kühlung	Optimierung der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur	30%
Pumpen, Motoren	Bremsenergie-Rückgewinnung	30%

Tabelle 1 Beispiele von Optimierungsmöglichkeiten [6]

Die aufgeführten Maßnahmen sind Beispiele und in der rechten Spalte wird die maximal mögliche Ersparnis durch das Umsetzen vieler Maßnahmen aufgezeigt. Wie hoch die Investitionen eines Unternehmens für Energiemanagement sind hängt mit der Strategie zusammen, für die sich das Unternehmen entschieden hat. Eine maximale Strategie würde das Umsetzen aller wirtschaftlich rentabler Energiemaßnahmen bedeuten.

Aufgrund der EU-Energieeffizienzrichtlinie wurde am 5.02.2015 das EDL-G (Energiedienstleistungsgesetz) im Bundestag beschlossen und trat am 22.04.2015 in Kraft. Die Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie in deutsches Recht verpflichtet ca. 50.000 Großunternehmen in Deutschland 2015 erstmals dazu, ein Energieaudit für alle ihre Betriebsstätten durchführen zu lassen. [7]

Ein Audit analysiert, ob Prozesse, Anforderungen und Richtlinien bestimmte Standards erfüllen und spielen eine wichtige Rolle beim Einrichten, Zertifizieren und Aufrechterhalten von Managementsystemen. Nachteil daran ist, dass nur eine Momentaufnahme stattfindet. Der entstehende Bericht wird zwar alle vier Jahre erneuert, doch eine merkbare Ersparnis findet erst durch die kontinuierliche Optimierung, hervorgerufen durch das Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 oder das Umweltmanagementsystem nach EMAS statt. Dieses sind Normen, die die Anforderungen an ein Energiemanagementsystem beschreiben.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil für eine effektive Kostenreduktion ist das Einsetzen eines Energiespeichers wie dem SIESTORAGE von Siemens, wodurch Spitzenlasten mit der gespeicherten Energie unterstützt werden und dadurch die Produktionsspitzen vom Leistungspreis entkoppelt wird. Zudem wird der Unberechenbarkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, welche zu Schwankungen und Ungleichgewichten führen, entgegengewirkt.

3.1.1 Hemmnisse

Für ein Unternehmen gibt es jedoch gewisse Hemmnisse bei der Umsetzung eines solchen Systems. Dadurch werden Einsparpotentiale nur zögerlich realisiert. Diese Hemmnisse entstehen dadurch, dass in vielen Betrieben der Verbrauch an Energie und die Kosten intransparent sind, kein Interesse vorhanden ist oder es keinen Energieverantwortlichen gibt. Außerdem kann es an personellem, sowie zeitlichem Mangel liegen oder sich ein Zweifel an der Retabilität entwickeln. Eine Sanierung oder Optimierung am Produktionskreislauf könnte Produktionsunterbrechungen hervorrufen, welche zu starken finanziellen Schäden führen kann. Selbst kleine Unterbrechungen für wenige Sekunden können Schäden von mehreren Millionen verursachen. Eine stabile Stromversorgung hat dementsprechend eine hohe Priorität. Eine große Bedeutung liegt außerdem bei der teilweise sehr hohen Amortisationszeit. Diese kann bei finanziell größeren Maßnahmen bishin zu 10 Jahren betragen.

Es lässt sich also sagen, dass Unternehmen grundsätzlich investieren wollen, aber für das kundenorientierte Kerngeschäft werden Erlöse eines Projektes meist für die Finanzierung des nächsten Projektes benutzt, wodurch nicht immer Geld für Energiemanagement übrig bleibt.

[4] AGIMUS GmbH, Vor- und Nachteile eines Energiemanagementsystems, www.agimus.de/haupt-navigation/managementsysteme/energie/vor-und-nachteile-eines-energiemanagementsystems/ [Zugriff am 27.12.15].

[5] glp, VW Werk Braunschweig ist Vorbild für Energiemanagement, 10.06.2010 www.focus.de/auto/news/pkw-vw-werk-braunschweig-ist-vorbild-fuer-energiemanagement_aid_518076.html [Zugriff am 5.1.16].

[6] Tobias Offel, vPRESS. GmbH, Maßnahmen: Energiesparen im Unternehmen, www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiesparen-unternehmen.html [Zugriff am 10.1.16].

[7] Annika Burchard, TÜV NORD GROUP, 11..2.15, www.tuev-nord.de/de/pressemitteilungen-575-energieaudits-werden-pflicht-fuer-alle-grossen-unternehmen-114196.htm [Zugriff am 12.12.16].

3.2 Energiemanagement im Haushalt

Im Haushalt fängt Energiemanagement mit einfachsten Mitteln an. Leistungsmessgeräte kaufen, Zählerstände kontrollieren und protokollieren, sowie Senken der Heizung bei Nacht oder sparsamerer Umgang mit Wasser. Schon allein durch einen bewussten Umgang mit Energie lassen sich so bis zu 10% der Kosten einsparen.[8]

Für das Eigenheim ist eine weitere Maßnahme die Installation einer PV (Photovoltaik) Anlage, welche Strom für den Eigenbedarf produziert und eine gute Korrelation zwischen Netzlast und Erzeugung darbietet.

Auf dem Markt befinden sich schon heutzutage sehr gute Systeme, welche in Verbindung mit einer PV Anlage in den täglichen Gebrauch integriert sind. Sie erhöhen den Eigenverbrauchsanteil an selbstproduzierten Strom um einiges.

Solche Systeme arbeiten nach dem Prinzip, dass sie zunächst den Energiefluss analysieren sowie Prognosen und Statusberichte erstellen. Desweiteren werden potentielle Verbraucher im Haus intelligent und automatisch über Funksteckdosen angesteuert, wodurch der Stromverbrauch im Haushalt an die Leistung der Solaranlage angepasst wird. Letztlich kann überschüssiger Strom aus der Energieerzeugung der PV Anlage in einem im System integrierten Speicher abgespeichert werden. Der Stromspeicher trägt dazu bei eine ausfallsichere Stromversorgung für kurze Zeit zu gewährleisten.[8]

Energiemanagementsysteme können variable Stromtarife auf dem Markt berücksichtigen und den Speicher bei günstigen Bedingungen kostengünstig einkaufen und abspeichern.

Ein weiterer Vorteil der verbreiteten Nutzung solcher Systeme ist die Verringerung des Bedarfs an Spitzenlastkraftwerken. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass zur Mittagszeit die Netzlast am höchsten ist und der Solarstrom diese Spitzen senkt.[8]

Als die PV Anlagen für den Verbrauchermarkt eingeführt wurden gab es für die Kunden einen hohen Anreiz diese umzusetzen, da mit steuerlichen Vorteilen geworben wurde und die Einspeisung in das Netz mit dem damit verbundenen Verkauf und Erlös sehr rentabel war.

Auf folgendem Bild sieht man zusammengefasst die generelle Integration eines Energiemanagementsystems der Firma SMA.

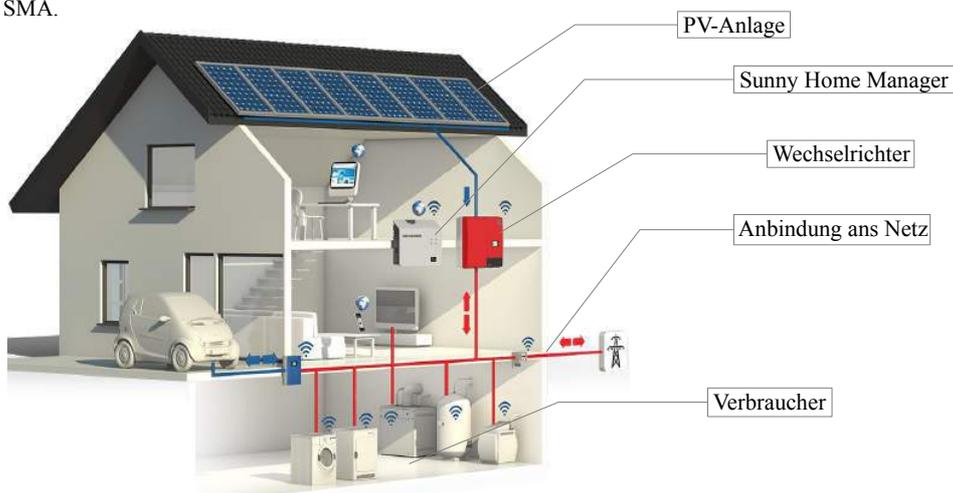


Bild 1 Beispiel Energiemanagementsystem im Haushalt [9]

Laut EU Richtlinie sollen ab 2020 nur noch Gebäude gebaut werden, deren Energiebedarf fast bei Null oder sehr gering ist und ausschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen beziehen. Solche Neubauten werden mit dem Begriff der "Fast-Nullenergiegebäude" betitelt.[10]

3.2.1 Hemmnisse

Wie auch in der Industrie gibt es gewisse Hemmnisse im häuslichen Bereich Energiemanagement im Rahmen eines Systems mit PV Anlage zu betreiben. Prinzipiell treten bereits Probleme bei der Finanzierung auf. Ein Kapitalzugang bei der Bank wird durch unattraktiv hohe Amortiationszeiten erschwert.

In Bezug auf ein Mehrfamilienhaus müsste der Eigentümer des Hauses die Kosten tragen. Laut Gesetz dürfen 11% der Modernisierungskosten auf die Kaltmiete umgelegt werden. Dies hätte zur Folge, dass viele Wohnungen nicht mehr sozialverträglich wären.

Zuzüglich gibt es Unsicherheiten über den potentiellen Sparerfolg. Dies liegt daran, dass die Menschen noch nicht genug über dieses Thema informiert wurden.

[8] SMA Solar Technology AG, www.sma.de/fileadmin/content/global/Solutions/Documents/HOMEMANAGER-ADE112210.pdf [Zugriff am 15.1.16].

[9] www.sma-sunny.com/wp-content/uploads/2012/07/schwalm_02_25001.png.

[10] Dr. Dieter Thiel, cci Dialog GmbH, 9. April 2014, www.cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/waerme_energietechnik/der_weg_zum_fast-null-energie-gebäude.html [Zugriff am 17.1.16].

4 Zusammenfassung / Fazit

Energiemanagement wird in den nächsten Jahren zu einer großen Bedeutung heranwachsen. Dementsprechend ist das Marktpotential sehr groß. Vor allem im Bereich der Dienstleistungen. Laut Bundesamt für Energieeffizienz werden hier bereits zwischen 250 und 500 Millionen Euro pro Jahr umgesetzt, mit steigender Tendenz.

Die Nachfrage steigert sich nur langsam, da viele Privatkunden zu wenig über ihren Verbrauch und den damit verbundenen Kosten aufgeklärt werden.

Es gibt zu wenig Werbung, die die Einführung erleichtern würden und der Gesetzesgeber müsste neben ihren Absichtserklärungen und Willensbekundungen endlich eine wirksame, steuerliche Förderung Energiemaßnahmen einführen. Als vielversprechender Ansatz gilt die verstärkte Nutzung und Propaganda, wodurch beschriebene Hemmnisse reduziert werden können.

Als eine negativ einzustufende Maßnahme wäre die Einfuhr eines Gesetzes für die Industrie, Energiemanagementsysteme flächendeckend einzuführen und entsprechende Vorkehrungen zu unternehmen. Durch die dadurch entstehenden finanziellen Probleme würden die Wirtschaft schädigen und man könnte das Überleben eines Unternehmens nicht garantieren.

Abschließend heißt es für beide Bereiche sich kontinuierlich mit dem Thema zu beschäftigen, da dies ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Implementierung eines Energiemanagementsystems ist.



Energiemanagement in Industrie und Haushalt

Götz-Nikolaus Grobelny, 25.01.2016

Agenda

- Energiemanagement/-systeme
- Umsetzung in der Industrie
- Umsetzung im Haushalt
- Ausblick / Fazit / Zusammenfassung



Agenda

- Energiemanagement/-systeme
- Umsetzung in der Industrie
- Umsetzung im Haushalt
- Ausblick / Fazit / Zusammenfassung

Was ist Energiemanagement ?

Energiemanagement umfasst die Summe aller Maßnahmen, die geplant und durchgeführt werden, um bei geforderter Leistung einen minimalen Energieeinsatz sicherzustellen.

Und wofür brauchen wir das eigentlich ?

- Ressourcen schonen
- Damit einhergehender Klimaschutz
- Kostensenkung
- Gleichzeitige Sicherstellung des Energiebedarfs des Nutzers

Was ist ein Energiemanagementsystem ?

Die Gesamtheit von miteinander zusammenhängenden oder in Wechselwirkung zueinander stehenden Elementen einer Organisation zur Erstellung einer Energiepolitik sowie strategischer Ziele und zur Erreichung dieser Ziele

Kurz: Eine Optimierung des Energieverbrauchs

Agenda

- Energiemanagement/-systeme
- Umsetzung in der Industrie
- Umsetzung im Haushalt
- Ausblick / Fazit / Zusammenfassung

Umsetzung in der Industrie

- **Wichtig:** Feste Verankerung im Unternehmen
- Hierarisch zwischen Geschäftsleitung und Beschaffung, Marketing und Produktion
- PDCA Methode
- Software
- Externe Dienstleister
- **Vorteile**
- Steuerrückerstattung
- Produktionsqualität
- Image
- Wettbewerbsfähigkeit
- **System oder Audit ?**
- Auditpflicht nach Energieeffizienzrichtlinie (KMU/ Großunternehmen)



[1]

Vergleich System zu Audit

ISO 50001	Energieaudit
Kontinuierliche Verbesserungen	Einmal-Effekt (Momentaufnahme)
Bewährtes System	Kaum Erfahrungswerte
	Kein Handlungszwang
	Frist: 5.12.15
Weltweit anerkannt	Europaweit anerkannt
Kostengünstiger durch Einsparungen	Beratungsaufwand für regelmäßige Wiederholungsaudits langfristig ähnliche Kosten wie Einführung und Pflege eines ENMS

PDCA Methode

- Plan
 - Planung der Umsetzung
 - Erkennung von Verbesserungspotenzialen
- Do
 - Einführung
 - Umsetzung



Iterativer Prozess

PDCA Methode

- Check
 - Überprüfen
 - Management-Review
- Act
 - Korrekturmaßnahmen
 - Dokumentation
 - Einhaltung prüfen



Iterativer Prozess

Beispiele für Maßnahmen einer Optimierung

Bereich	Maßnahme	Ersparnis
Beleuchtung	Effizientere, besser positionierte Lampen	70%
Heizkosten	Solarthermie nutzen	30%
Kühlung	Optimierung der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur	30%
Pumpen, Motoren	Bremsenergie-Rückgewinnung	30%

[12]

Volkswagen

- Bereits 1996 Umweltmanagement eingeführt (DIN 14001)
- u.a. Stromverbrauch
- 2010 bekam das Volkswagen Werk Braunschweig ein Zertifikat für Energiemanagementsysteme vom TÜV Nord
- Weltweit der erste Standort, der die nötigen Vorgaben der DIN EN 16001 erfüllt.
- Rund 10 000 Tonnen CO² jährliches Einsparpotential.
- Zu- und Abluftmenge, Erneuerung von Kompressoren (Druckluft, eine der teuersten Energien)



[7]

Salzgitter AG

- Beginn 2011
- Verbrauchsanalyse
- Nutzungspotential unvermeidbarer Wärme
- Optimierung für kontinuierliche Verbesserungen
- 150.000t CO² vermieden, 9 M € in 3 Jahren
- Einsparungen ~ 12 Mio. € pro Jahr ab 2012



Hemmnisse

- Hemmnisse entstehen dadurch, dass in vielen Betrieben der Verbrauch an Energie und die Kosten intransparent sind, kein Interesse vorhanden ist oder es keinen Energieverantwortlichen gibt.
- Amortiationszeit zwischen 18-36 Monaten, teilweise bis zu 10 Jahren
- Mangel an zeitlichen und personellen Kapazitäten
- Zweifel an der Finanzierbarkeit und Rentabilität
- Produktionsunterbrechungen bei technischen Lösungen (15% der KMU)
- Bequemlichkeit
- Sinkende Unternehmensgröße → erhöhte Schwierigkeit bei externer Finanzierung
- Priorität hat das Kerngeschäft

Agenda

- Energiemanagement/-systeme
- Umsetzung in der Industrie
- Umsetzung im Haushalt
- Ausblick / Fazit / Zusammenfassung

Umsetzung im Haushalt

- Bis zu 10 % Einsparung bei bewusstem Umgang mit Energie
- Messgeräte
- Zählerstände kontrollieren/protokollieren
- Heizung bei Nacht senken
- Installation einer PV Anlage
- PV-Energie gute Korrelation zw. Netzlast und Erzeugung
- Managementgeräte
- Stromspeicher
- EU Richtlinie für Neubauten ab 2020
- „Fast-Nullenergiegebäude“
- Autarke Lebensweise



Umsetzung im Haushalt



[5]

1. umfassenden Analyse, Prognose und Information
 2. automatische Verbrauchersteuerung
 3. Zwischenspeicherung von Energie
- Statusberichte
 - Handlungsempfehlungen
 - Funksteckdosen zur Ein- und Ausschaltung von Verbrauchern
 - Überschüssige PV-Energie in Speicher laden
 - Speichergröße im Bereich von 2kWh
 - Vorteile: Netzentlastung (Spitzenlastreduktion), hoher Eigenverbrauchsanteil

Hemmnisse

- Probleme beim Kapitalzugang unattraktiv für Banken
- 11% der Modernisierungskosten auf die Kaltmiete umlegen → nicht mehr sozialverträglich
- Unsicherheit über den Sparerfolg, kaum noch finanzielle Anreize

Agenda

- Energiemanagement/-systeme
- Umsetzung in der Industrie
- Umsetzung im Haushalt
- Ausblick / Fazit / Zusammenfassung

Zusammenfassung / Ausblick

- Das Marktpotential groß, doch die Nachfrage bei Privatkunden steigert sich nur langsam, da viele Privatkunden zu wenig über ihren Verbrauch und den damit verbundenen Kosten aufgeklärt sind
- Gesetzgeber neben den Absichtserklärungen und Willensbekundungen endlich auch eine wirksame, steuerliche Förderung von Effizienzmaßnahmen
- Entscheidung über Durchführung und Nichtdurchführung sollte im Unternehmen bleiben, da es teilweise ums „Überleben“ geht
- Verstärkte Nutzung des Energiemanagements gilt als vielversprechender Ansatz, um die Relevanz Hemmnisse zu reduzieren
- Speicher werden zukünftig sehr wichtig, Reduzierung von Spitzenlasten

Zusammenfassung / Ausblick

- **Marktentwicklung:**
- andauernde Weiterentwicklung der Märkte für Energieaudits, Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen
- Laut BfEE: Energiemanagement-Dienstleistungen insgesamt mit 250 bis 500 Mio. Euro Umsatz pro Jahr, Tendenz steigend
- **Wichtig:** Kontinuierliche Beschäftigung mit dem Thema für beide Bereiche

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Noch Fragen ?

Literaturverzeichnis

- [1] www.lebensmittelverarbeitung-online.de/sites/default/files/article/Fotolia_47618726_XS_energie_0.jpg
- [2] www.tuv.com/media/germany/60_systeme/energie_umwelt/microseite/Ueberblick_ISO50001_und_Energieaudit.pdf
- [3] http://www.hermes-systeme.de/images/news/2012-05/energiemanagement_2.png
- [4] http://www.openpr.de/images/articles/m/8/m82328433_g.jpg
- [5] http://www.sma-sunny.com/wp-content/uploads/2012/07/schwalm_02_25001.png
- [6] www.focus.de/auto/news/pkw-vw-werk-braunschweig-ist-vorbild-fuer-energiemanagement_aid_518076.html
- [7] <http://p5.focus.de/img/fotos/origs978315/8528436131-w1280-h960-q72-p4/131714-VW-Werk-Braunschweig-ist-Vorbild-fuer-Energiemanagement.jpg>
- [8] <http://www.salzgitter-ag.de/karriere-blog/wp-content/themes/szag/images/logo.gif>
- [9] <https://www.salzgitter-ag.com/de/corporate-responsibility/umwelt-energie/energie-ressourceneffizienz/massnahmen-zur-senkung-des-energieverbrauchs-ressourcenschonung.html>
- [10] <http://www.energie-und-management.de/nachrichten/alle/detail/wachstumspotenzial-fuer-energiesdienstleistungsmarkt-100560>
- [11] http://www.bafa.de/bfee/marktentwicklung/livestive_massnahmen/hemmnisse/index.html
- [12] <http://www.energieeffizienz-im-betrieb.net/energiesparen-unternehmen.html>



Erlösmöglichkeiten für die Vermarktung von PV- und Windstrom

Proceeds from wind and photovoltaic energy

Robert Hankers, B.Sc.

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - **elenia**, robert.hankers@tu-bs.de

Kurzfassung

Seit 2012 haben die Betreiber von Stromerzeugungsanlagen die Möglichkeit, die von ihnen erzeugte Energie direkt an den Strombörsen zu handeln, anstatt sie wie bisher zu festen Vergütungssätzen in die Stromnetze einzuspeisen. Gerade bei der Erzeugung von Wind- und PV-Strom kann dabei durch genaue Prognosen ein zusätzlicher Gewinn erwirtschaftet werden. Die hieraus entstandenen neuen Erlösmöglichkeiten, die beteiligten Marktteilnehmer und die ebenfalls neu hinzugekommenen Ausschreibungsverfahren für Neuinstallationen werden in diesem Beitrag vorgestellt und erläutert.

Abstract

Since 2012, the producers of green energy in Germany have had the opportunity to trade their produced energy directly at the energy stock exchange, instead of feeding it into the energy grid for fixed compensation. Especially for the production from wind or photovoltaics, additional profit can be achieved by means of accurate production projections. This results in a number of new ways for marketing the produced energy, which, along with the market participants and the bidding process for newly installed units, will be described and explained in this paper.

1 Einleitung

Durch die Einführung des Marktprämienmodells mit der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2012 wurde Betreibern von Erneuerbaren Energien (EE) die Direktvermarktung der erzeugten Energie ermöglicht. Neben einer verbesserten Netzstabilität sollen damit eine bessere Integration der EE in den Energiemarkt und die langfristige Unabhängigkeit von EEG-Fördergeldern erzielt werden.[1] Für die Erzeuger ergeben sich damit neben der Einspeisung eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, die erzeugte Energie gewinnbringend zu vermarkten. Von großer Bedeutung ist hierbei die möglichst genaue Prognose der erzeugten Leistung. Zusätzlich wurde im Jahr 2014 neben einer Anpassung der Vergütungssätze ein Ausschreibungsverfahren für die Neuinstallation von PV-Freiflächenanlagen eingeführt, um die Höhe der finanziellen Förderung zu ermitteln [1][2].

2 Grundlagen

Mit dem Modell der Marktprämie in Kombination mit der Managementprämie wurde ein System entwickelt, durch welches Energieerzeuger durch genaue Prognosen ihrer produzierten Energiemengen finanzielle Vorteile erlangen können.

Statt wie bisher ihre Energie zu einem festen Vergütungssatz in das Stromnetz einzuspeisen, können Erzeuger ihre Energie durch das neue Modell an der Strombörse verkaufen. Die hier erzielten Strompreise sind in der Regel niedriger als die bisherigen Einspeisevergütungen. Allerdings

wird der Differenzbetrag zwischen durchschnittlichem Erlös und Einspeisevergütung vom Netzbetreiber als Marktprämie an den Erzeuger ausgezahlt, so dass kein finanzieller Nachteil entsteht. Zusätzlich erhält der Erzeuger eine Managementprämie, welche zum Ausgleich von durch Fehlprognosen verursachten Verlusten dient. [1]

Bei entsprechend genauen Prognosen lässt sich also auf diese Art ein höherer Gewinn erzielen als durch die Einspeisung zu fester Vergütung. Dadurch sollen Erzeuger zu einer Marktteilnahme motiviert werden, um auf dem für sie neuen Feld des Energiemarktes Fuß zu fassen und damit auch ohne Förderung durch das EEG konkurrenzfähig zu werden.

Ebenfalls mit dem EEG 2014 neu in Kraft getreten ist die Ausschreibung der Förderung für PV-Freiflächenanlagen. Hierbei werden aus einem Pool von Geboten so lange Neuinstallationen zur Förderung bewilligt, bis das Volumen der Ausschreibungen erfüllt ist. Die niedrigsten Gebote erhalten zuerst den Zuschlag, so dass nur die wirtschaftlichsten Projekte umgesetzt werden. [2]

3 Preisbildung an den Strombörsen

Die Art und Weise, nach der sich die Strompreise an den Börsen für die Kunden ergeben, sollen beispielhaft an der European Energy Exchange (EEX) erläutert werden. Die EEX ist mit über 240 Börsenteilnehmern aus derzeit 44 Ländern die größte Strombörse Europas [3]. Die hier getätigten Geschäfte können in 3 Kategorien aufgeteilt werden: Terminhandel, Day-Ahead-Handel und Intraday-Handel. Beim Terminhandel werden, oft für mehrere Jahre im

Vorraus, konkrete Lieferverträge zwischen Stromlieferant und -verbraucher abgeschlossen. Diese Art der Vermarktung ist für PV- und Windstrom weitestgehend uninteressant, da über solche Zeiträume keine Erzeugungsprognosen getroffen werden können.

3.1 Day-Ahead-Handel

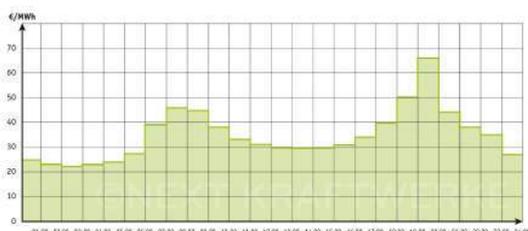


Abbildung 1 Preisverlauf beim Day-Ahead-Handel über einen Tag [1]

In Abbildung 1 ist ein beispielhafter Tagesverlauf des Börsenstrompreises beim Day-Ahead-Handel gezeigt. Hier können jeweils bis 12 Uhr Mittags Gebote für den Folgetag in Form von Stundenkontrakten abgegeben werden, wobei Anbieter ihren Minimalpreis und Abnehmer ihr Maximalgebot angeben. Geboten wird auf die pro Stunde genutzte/gelieferte Leistung, wobei der Preis zwischen -500 €/MWh und 3000 €/MWh liegen muss. Der Preis, welcher die höchste Deckung zwischen Angebot und Nachfrage bedeutet, wird Market Clearing Price genannt. Sämtliche Transaktionen werden dann zu diesem Preis getätigt, so dass Anbieter mit höheren bzw. Abnehmer mit niedrigerem Gebot keinen Zuschlag erhalten. [3]

Anbieter mit geringen variablen Kosten können zu niedrigeren Preisen wirtschaftlich Strom anbieten, so dass Anbieter mit hohen variablen Kosten auf diese Art vom Markt gedrängt werden. Da die Produktion von PV- und Windstrom sehr geringe variable Kosten verursacht, führt dies einerseits zu einer Verdrängung der teureren fossilen Energien und andererseits zu einer Reduzierung des Börsenstrompreises. Dieser Mechanismus ist unter dem Begriff Merit-Order-Effekt bekannt. [4]

3.2 Intra-Day-Handel

Anders als beim Day-Ahead-Handel wird der Strompreis beim Intra-Day-Handel für jede Transaktion einzeln bestimmt. Gehandelt wird mit Viertel-Stunden-Blöcken, welche bis 30 Minuten vor Beginn der Lieferung erworben werden können. Ab 15 Uhr können auch Gebote für den Folgetag getätigt werden, wobei die Gebote den Betrag von 9999 €/MWh nicht überschreiten dürfen. [3]

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, hängt der erzielbare Preis stark vom Zeitpunkt des Handels ab. Durch eine bedarfsorientierte Produktion und eine entsprechende Vermarktung lässt sich die Wirtschaftlichkeit erhöhen, in dem der erzeugte Strom bei möglichst hoher Nachfrage verkauft wird. Da PV- und Windanlagen anders als konventionelle Kraftwerke nicht nach Bedarf produzieren können, son-

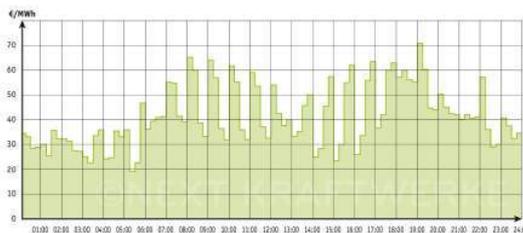


Abbildung 2 Preisverlauf beim Intra-Day-Handel für einen Tag [1]

dern auf bestimmte Wetterbedingungen angewiesen sind, ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer möglichst genauen Prognose des Wetters und damit der tatsächlichen Erzeugung, um die verkaufte Energie zum entsprechenden Zeitpunkt auch liefern zu können.

4 Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Neben der klassischen und bis 2012 einzigen Methode, den erzeugten Strom gegen eine Einspeisevergütung direkt ins Stromnetz zu speisen, gibt es seit dem 01. Januar 2012 mit der Direktvermarktung eine weitere Möglichkeit des Wirtschaftens, welche seit dem 01. Januar 2016 für alle Anlagen über 100 kW verpflichtend ist. Erzeuger mit geringerer Leistung können sich monatlich zwischen der fixen Einspeisevergütung oder der Direktvermarktung entscheiden, müssen das jedoch 3 Monate im Voraus anmelden. Desweiteren haben Erzeuger die Möglichkeit, durch die Teilnahme am Regelenergiemarkt weitere Gewinne zu erzielen. [4]

4.1 Einspeisevergütung

Kernbestandteil des EEG ist die sogenannte Einspeisevergütung, welche vorschreibt, dass Betreiber von EE-Anlagen für die Einspeisung des produzierten Stroms in die Netze eine finanzielle Vergütung erhalten. Diese ist unabhängig vom tatsächlichen Strompreis und soll dazu beitragen, dass diese Anlagen wirtschaftlich betrieben werden können. Die Einspeisevergütung variiert je nach Art (PV, Windkraft Onshore, Windkraft Offshore) und Installationsort (z. B. Hausdach oder Freifläche für PV, Entfernung und Wassertiefe für Windkraft) der Anlage und wird für 20 Jahre ausgezahlt. Sie unterliegt einer zeitlichen Regression, so dass Anlagen, welche später ans Netz gehen, geringere Vergütungen erwirtschaften. Die Höhe der Regression ist abhängig vom Zubau neuer Anlagen, wodurch theoretisch sogar eine Erhöhung der Vergütungssätze stattfinden kann. [4]

4.2 Direktvermarktung

Wie bereits erwähnt, ist seit 2012 für Neuanlagen und seit dem 1. Januar 2016 auch für Bestandsanlagen über 100 kW Erzeugungsleistung die Direktvermarktung an der Strom-

börse verpflichtend. Um das Verlustrisiko für Anlagenbetreiber möglichst gering zu halten, wurde zeitgleich das Marktprämienmodell eingeführt. Dieses besagt, dass die Direktvermarkter der EE eine Prämie erhalten, die der Differenz zwischen dem durchschnittlichen Börsenstrompreis und der aktuellen Einspeisevergütung entspricht (siehe Abbildung 3). [4]

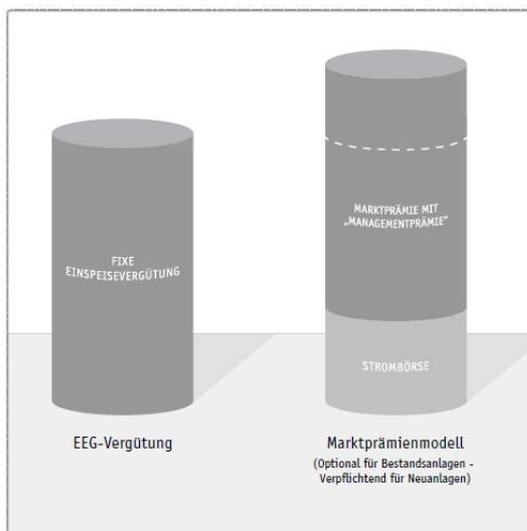


Abbildung 3 Die Markt- und Managementprämie [5]

Neben der Risikominimierung soll hierdurch die Attraktivität der Marktteilnahme gewährleistet werden, um die Erzeuger zum Stromhandel zu motivieren. Darüber hinaus können Anbieter, wenn sie ihren Strom zu Zeiten hoher Nachfrage verkaufen, einen Gewinn erwirtschaften, der über die Höhe der Einspeisevergütung hinaus geht [1]. Zusätzlich zur Marktprämie wird den Betreibern volatiler Erzeugungsanlagen noch eine Managementprämie ausbezahlt (siehe Abbildung 3), um sie für den Mehraufwand für die notwendigen Prognosen und die Regelbarkeit der Anlagen zu entschädigen. Die Managementprämie beträgt unabhängig von der Höhe des Börsenstrompreises und der Einspeisevergütung 0,4 ct/kWh und kann somit auch zu einem wirtschaftlichen Betrieb beitragen. Seit der EEG 2014-Novelle ist sie in die Marktprämie eingepreist, wird also nicht mehr als separater Posten auf der Abrechnung ausgewiesen. [4]

4.3 Regelernergie

Prognosen über die Erzeugung oder den Verbrauch von Energie können von den tatsächlichen Gegebenheiten abweichen. Da jedoch zu jeder Zeit ein Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter Energie herrschen muss, müssen Unterschiede zwischen den Prognosen und dem tatsächlichen Verlauf durch den Einsatz von Regelernergie ausgeglichen werden. Allein schon für die Bereitstellung von Regelernergie werden Erzeuger mit einem Leistungspreis vergütet (die sog. Bereitschaftsvergütung). Im Bedarfsfall kommt dann der Arbeitspreis hinzu, welcher für

tatsächlich abgerufenen Strom bezahlt wird. Diese Preise werden über Gebote am Regenergiemarkt ermittelt und liegen im Normalfall deutlich über dem Standard-Strompreis. [1] Dies erfordert eine bedarfsorientierte Energieerzeugung, welche von einzelnen PV- oder Windanlagen nicht erbracht werden kann. Damit volatile Erzeuger zukünftig dennoch zum Regenergiemarkt beitragen können, gibt es den Ansatz, sie zu „Virtuellen Kraftwerken“ zusammenzuschließen. Hierdurch könnten regionale Unterschiede in der Erzeugung durch einen logischen Verbund der einzelnen Anlagen ausgeglichen werden und somit eine zuverlässigere Versorgung gewährleistet werden. Die Steuerung dieser Anlagen würde von Stromhändlern durchgeführt, welche den Verbund der Anlagen wie ein einzelnes Kraftwerk regeln könnten.

Stromhändler übernehmen häufig (aber nicht notwendigerweise) auch den Handel an den Strombörsen für Privaterzeuger, die ihre Anlagen per Direktvermarktung betreiben möchten. Da hier in der Regel eine große Anzahl kleiner Anlagen gleichzeitig vermarktet wird, können einzelne Abweichungen von den - ebenfalls genaueren - Prognosen besser ausgeglichen werden. [1]

4.4 Ausschreibeverfahren für PV-Anlagen

Für PV-Freiflächenanlagen wurde mit der EEG-Novelle von 2014 eine weitere Neuerung eingeführt, welche den Zubau neuer Anlagen betrifft. Um dessen Höhe effizient regeln zu können, können seit April 2015 nur noch solche Anlagen von der Förderung durch das EEG profitieren, die zuvor in einem Ausschreibeverfahren einen Zuschlag für ihr Angebot erhalten konnten. Hierbei geben die Betreiber einer geplanten Anlage ein Gebot zur Höhe des von ihnen verlangten Förderungsbetrages ab. Anschließend erhalten so lange die günstigsten Gebote einen Zuschlag, bis ein vorher definiertes Volumen von Neuinstallationen erzielt ist. Im Jahr 2015 lag dieses Volumen bei 500 MW, in diesem Jahr werden es 400 MW sein und im Jahr 2017 werden noch 300 MW an Zubau bezuschusst. Um die Gebote auf wirtschaftlich aussichtsreiche Projekte zu beschränken, wird pro geplantem Kilowatt eine Kautions von 50 € erhoben, welche nur zurückgezahlt wird, wenn die entsprechende Anlage innerhalb der nächsten 24 Monate in Betrieb genommen wird. Desweiteren kostet jedes Gebot eine Gebühr von 750 € und die Größe eines einzelnen Projektes ist auf 10 MW begrenzt. [6]

5 Zusammenfassung

Mit der Einführung der Marktprämie wurde ein System erschaffen, welches den Betrieb von EE-Anlagen wirtschaftlich noch attraktiver macht. Sogar Privatpersonen können sich mit ihrer erzeugten Energie am Börsenhandel beteiligen und damit zusätzliche Gewinne erwirtschaften. Zusammen mit den neuen Ausschreibungen, welche die Wirtschaftlichkeit neuer PV-Anlagen weiter erhöhen dürften, wurde so ein weiterer Schritt zur erfolgreichen Integration der EE in die großflächige Stromerzeugung getätigt.

6 Literatur

- [1] Next Kraftwerke GmbH, Marktprämie & Marktprämienmodell, 14.01.2016, <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/marktpraemie>
- [2] Ausschreibungsverfahren für PV-Freiflächenanlagen allgemein, BNA Bundesnetzagentur, 09.12.2015, <http://bit.ly/1Nbecym>
- [3] Energy Exchange Europe, 09.12.2015, <http://www.eex.de/>
- [4] Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken; BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 11.05.2015
- [5] Ihre Windanlage im EEG 2014 - Zusätzliche Erlöse in der Direktvermarktung; Next-Kraftwerke, Oktober 2014
- [6] FAQ zur Verordnung für Pilotausschreibungen für Photovoltaik-Freiflächenanlagen; BMWI Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 14.01.2016,



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Erlösmöglichkeiten für die Vermarktung von PV- und Windstrom

Robert Hankers, 20.01.2016

Einleitung



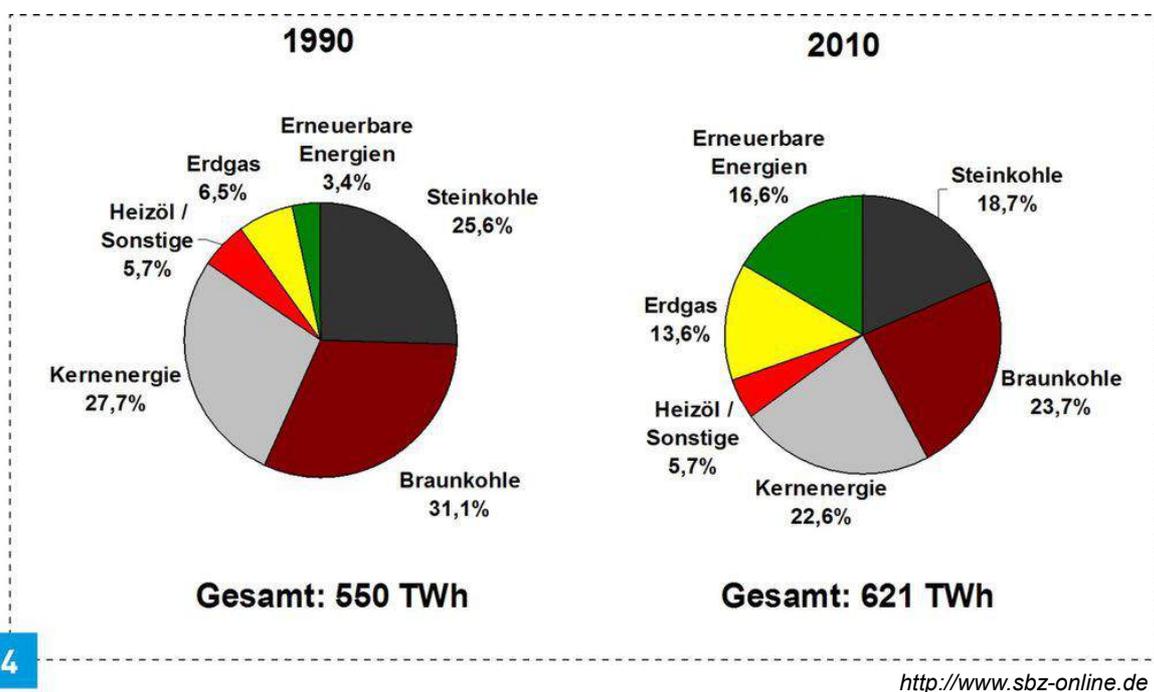
<http://www.energiezukunft-ostdeutschland.de>



Agenda

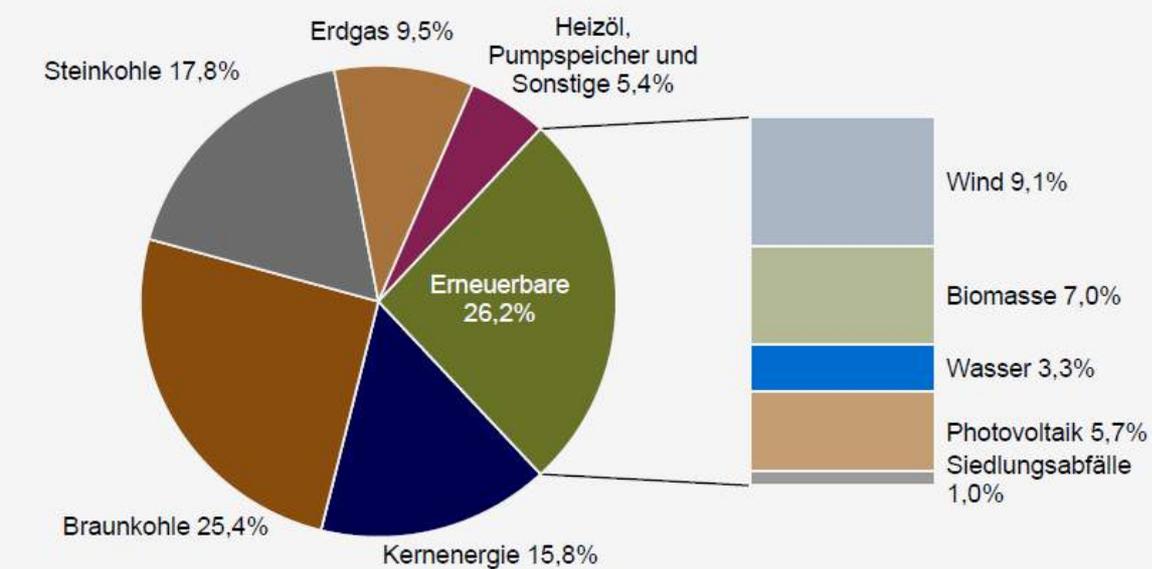
- Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung
- Strompreisbildung an der EEX
- Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom
- Zusammenfassung/Ausblick

Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung



Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung

Brutto-Stromerzeugung 2014 in Deutschland: 614 Mrd. Kilowattstunden*



Quellen: BDEW, AG Energiebilanzen Stand: 02/2015

* vorläufig

[5]

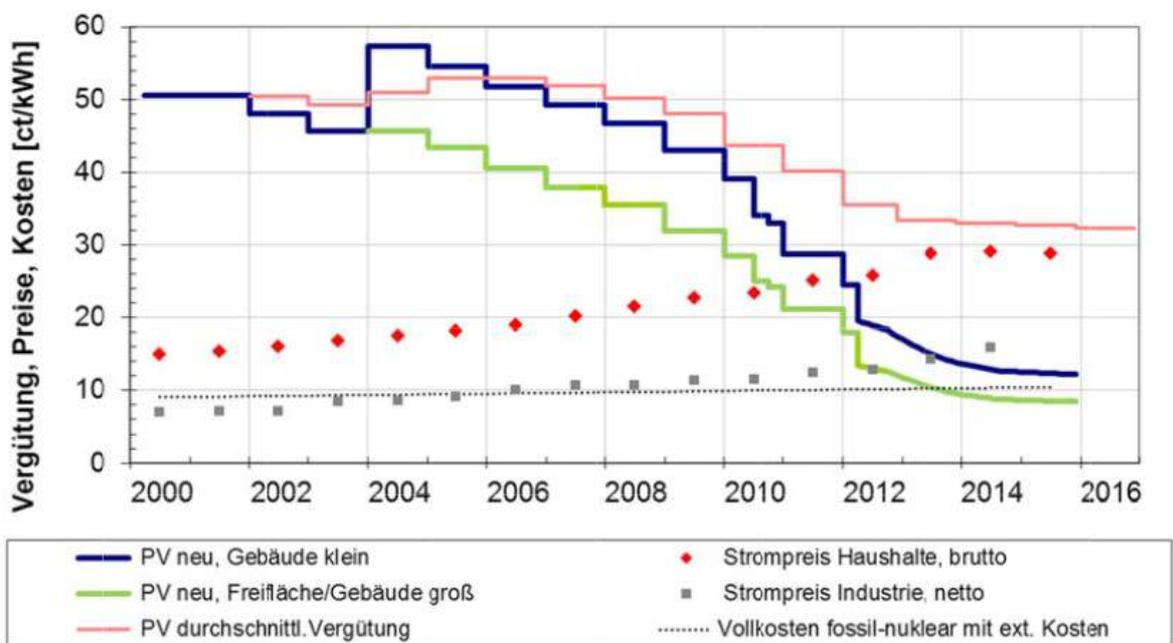
Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung

Photovoltaik

- Gewinnmöglichkeiten durch Einspeisung oder Selbstverbrauch
- Selbstverbrauch: Einsparung des Strompreises
- Einspeisung: Festgelegte Vergütung über 20 Jahre, abhängig von Peakleistung und Installationsort der Anlage
- Kontinuierliche Absenkung der Vergütung
- Seit 2011: Vergütung < Strompreis (Netzparität)

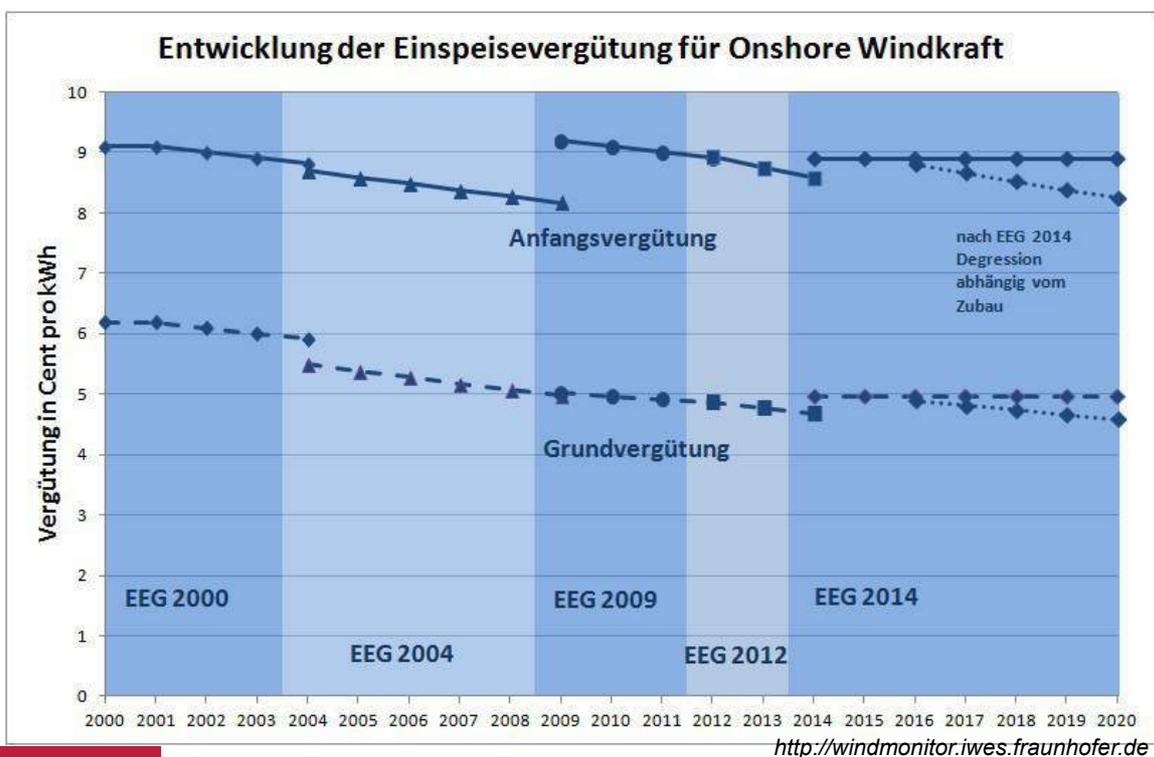
Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung

Vergütung nach EEG für PV-Strom-Einspeisung

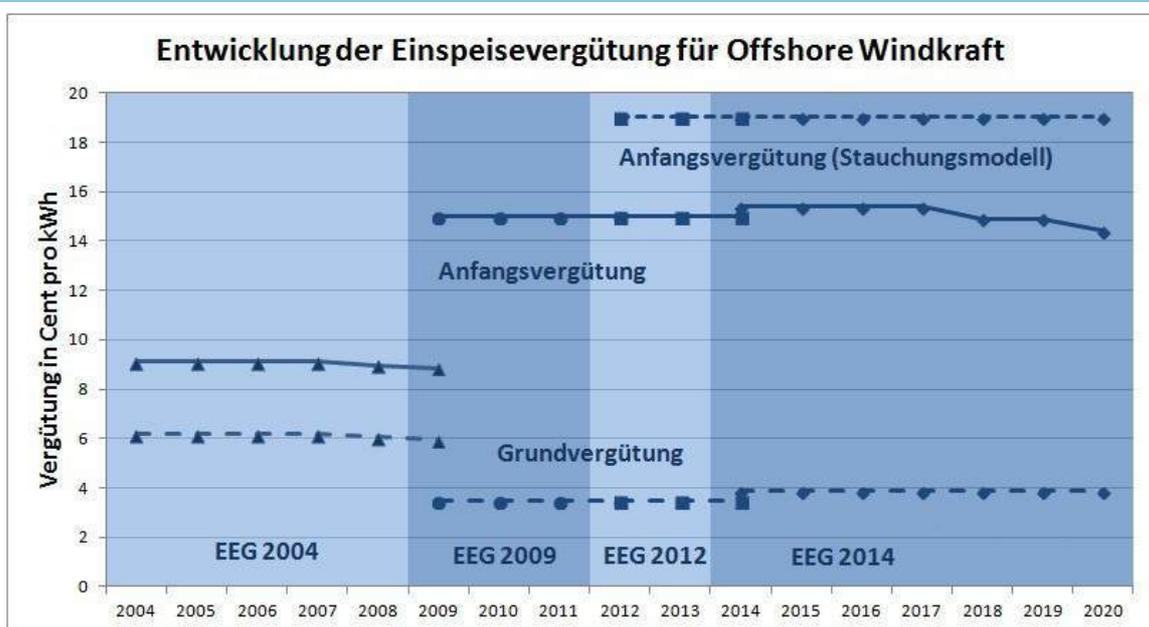


[2]

Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung



Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung



<http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de>

Agenda

- Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung
- Strompreisbildung an der EEX
- Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom
- Zusammenfassung/Ausblick

Strompreisbildung an der European Energy Exchange (EEX)



<http://www.finanzen.sachsen.de/>

- Größte Energiebörse in Europa
- Über 240 Börsenteilnehmer aus 24 Ländern
- Umsatz am Strom-Terminmarkt 2014: 1570,4 TWh (2013: 1206,4 TWh) (entspr. 25% Marktanteil)
- Sitz in Leipzig (Terminmarkt) und Paris (Spotmarkt, seit 2009)
- Terminmarkt: Längerfristige Verträge, bis zu 6 Jahre Vorlaufzeit
- Spotmarkt: Day-Ahead und Intraday

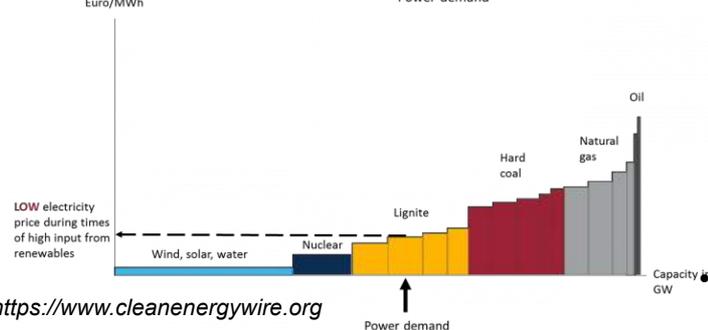
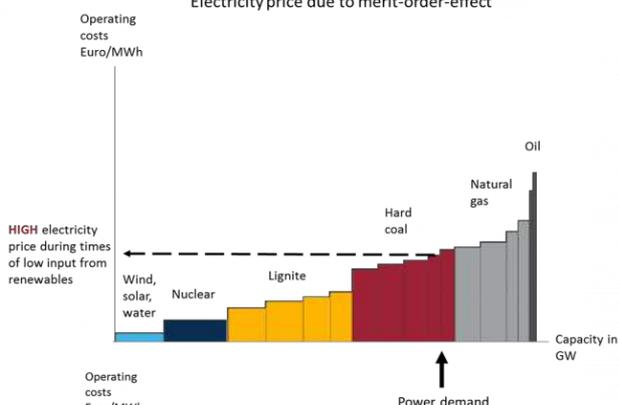
Strompreisbildung an der European Energy Exchange (EEX)

Day-Ahead-Handel

- Gebote für den Folgetag der Auktionen bis 12 Uhr Mittags
 - Kauf- und Verkaufsangebote als Stundenkontrakte oder für bestimmte Zeitblöcke (Base-/Peakload, Morning-Block etc.)
 - Ab 0,1 MW; -500 €/MWh bis 3000 €/MWh
- Typischer Preisverlauf im Day-Ahead-Markt
- 
- <https://www.next-kraftwerke.de>
- Strompreisbildung durch Markträumungspreis (Market Clearing Price):
 - Minimalgebot von Stromanbietern
 - Maximalgebot von Stromabnehmern
 - Zuschlag für jeweiligen Block zu dem Preis mit größtmöglicher Deckung von Angebot/Nachfrage → alle Anbieter erhalten den selben Preis

Strompreisbildung an der European Energy Exchange (EEX)

Electricity price due to merit-order-effect



<https://www.cleanenergywire.org>

Merit-Order-Effekt

- Erzeuger mit geringen variablen Kosten bieten zu niedrigem Preis an
 - Kernenergie
 - Braunkohle
- Erzeuger mit hohen variablen Kosten bieten zu hohem Preis an
 - Steinkohle
 - Gas
 - Öl

Erneuerbare: Sehr niedrige variable Kosten

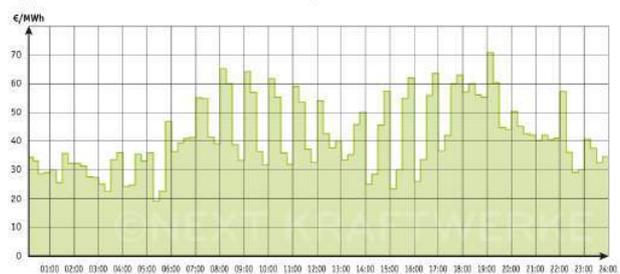


Strompreisbildung an der European Energy Exchange (EEX)

Intraday-Handel

- Stunden- und Viertelstunden-Blöcke
- Ab 15 Uhr für den Folgetag, bis 30 Minuten vor Lieferbeginn (seit 16. Juli 2015 – vorher 45 Minuten)
- Ab 0,1 MW; -9999 €/MWh bis 9999 €/MWh

Typischer Preisverlauf im Intraday-Markt



<https://www.next-kraftwerke.de>

- Strompreisbildung durch „Pay-as-Bid“ (Gebotspreise):
 - Zuschläge werden zu exakt dem ausgeschriebenen Preis vergeben
 - Keine Einheitspreise für jeweiliges Produkt → je nach Handelszeitpunkt unterschiedlicher Preis
- Ausgleich von Prognosefehlern
- Zunehmende Bedeutung: Bedarfsgerechte Stromproduktion

Agenda

- Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung
- Strompreisbildung an der EEX
- Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom
- Zusammenfassung/Ausblick

Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Direktvermarktung

- Statt fixer Einspeisevergütung: Direkter Verkauf an den Strombörsen
- Selber Marktpreis wie konventionell erzeugter Strom
- Bei guten Erzeugungsprognosen Mehrerlöse gegenüber der Einspeisevergütung möglich

Einspeisung/Förderung nach EEG

- Weiterhin eine Option: Fixe Einspeisevergütung
- Höhe abhängig von Installationsort, Leistung, Installationsdatum

Bereitschaftsvergütung

- Vorhalten von Regelenergie – positiv und negativ
- Wegen starker Volatilität von PV und Wind vor allem als virtuelles Kraftwerk interessant

Eigenverbrauch

- Einsparung der Stromkosten
- Erfordert u.U. zusätzliche Speichertechnologie

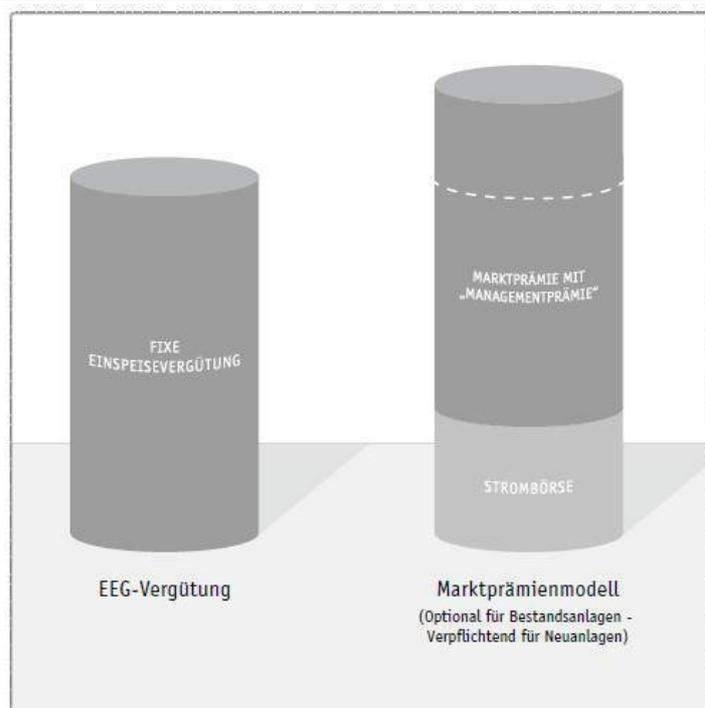
Regionale Direktvermarktung

- Strom wird direkt an Abnehmer in räumlicher Nähe verkauft

Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Direktvermarktung

- Seit dem 01. Januar 2012: Marktprämienmodell
- Seit EEG 2014 verpflichtend für Neuanlagen > 500 kW, seit 01. Januar 2016 für Neuanlagen > 100 kW
- Marktprämie gleicht Unterschied zw. \mathcal{E} -Börsenpreis und EEG-Einspeisevergütung aus

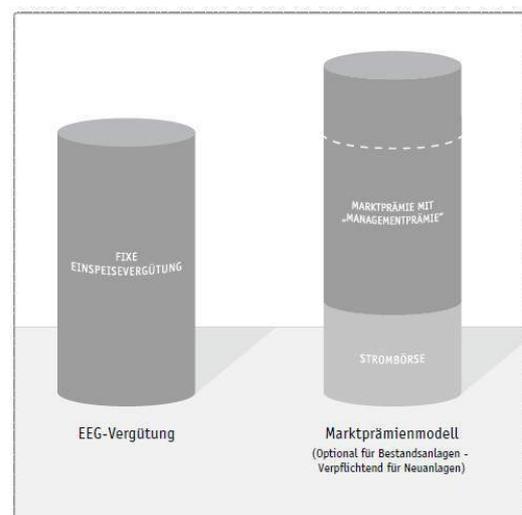


<https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung/marktpraemie>

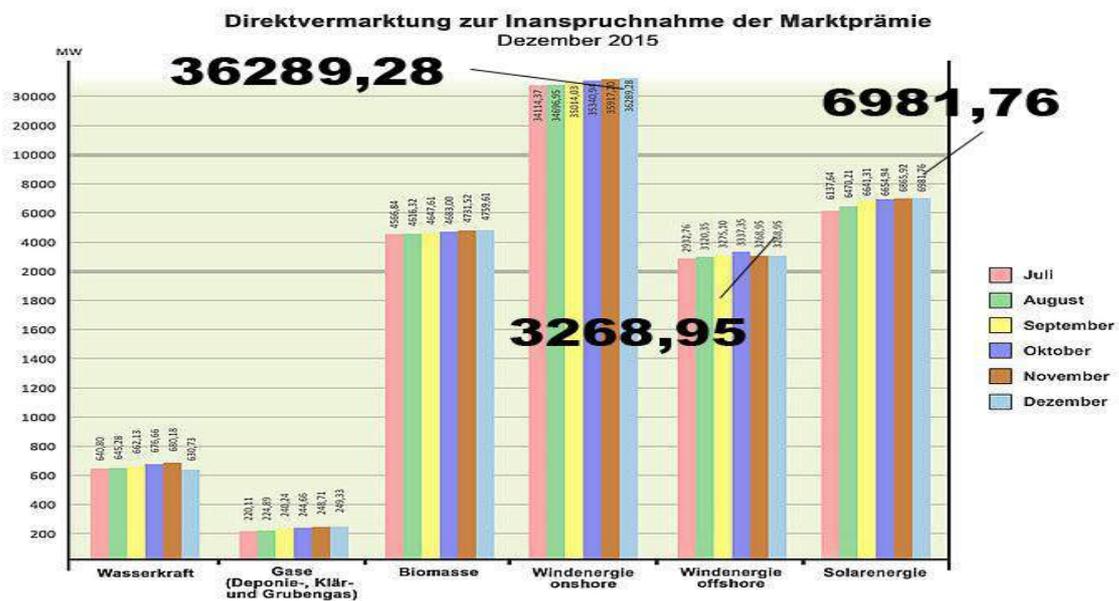
Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Direktvermarktung

- Verpflichtend für die Teilnahme: Einspeiseprognose (Dauer und Höhe)
- Verfehlung der Prognose: Ausgleichsenergiekosten
- Minimierung des finanziellen Risikos: Managementprämie (seit 2014 in Marktprämie enthalten)
- Seit 1. April 2015 müssen Neu- und Bestandsanlagen fernsteuerbar sein
- Anlagen < 100 kW: Monatlicher Wechsel zwischen Direktvermarktung und Einspeisung möglich



Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom



Monatsprognose Stand: 04.12.2015
Alle Angaben ohne Gewähr

Quelle: www.netztransparenz.de
Grafik: energy2market GmbH



Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Einspeisung/Förderung nach EEG

Windkraft Onshore:

- Gesamtvergütungsdauer 20 Jahre
- 5 Jahre Anfangsvergütung (8,93 ct/kWh) + Verlängerung je nach Ertrag (ertragreicher Standort = kürzere Verlängerung)
- Danach Grundvergütung: 4,95 ct/kWh
- Ausbaukorridor:
bei 2400 – 2600 MW/Jahr Zubau
→ 0,4 % Degression vierteljährlich

Windkraft Offshore:

- Gesamtvergütungsdauer 20 Jahre
- Anfangsvergütung: 8 Jahre (19 ct/kWh) oder 12 Jahre (13 ct/kWh) + Verlängerung je nach Standort (Wassertiefe und Entfernung zur Küste)
- Degression von 7 % ab 1. Januar 2018

Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Einspeisung/Förderung nach EEG

Photovoltaik:

- Dauer: 20 Jahre ab Jahr der Inbetriebnahme
- Abhängig von Installationsort, Leistung
- Monatliche Degression von schwankender Höhe, abhängig von Zubau
- Aktuell (Dezember 2015, in ct/kWh):

Bis 10 kWp	Dachanlagen		Nichtwohngebäude im Außenbereich und Freiflächen bis 100 kWp
	Bis 40 kWp	Bis 100 kWp	
12,31	11,97	10,71	8,53

- Für Freiflächenanlagen: Ausschreibungsverfahren

Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Freiflächenausschreibungsverordnung (EEG-Novelle 2014)

- Gültig seit April 2015
- Förderung nach EEG nur noch nach erfolgreicher Teilnahme an Ausschreibung
- Ausschreibung durch Bundesnetzagentur, 3 Ausschreibungsrunden
- 2015: 500 MW Zubau
2016: 400 MW Zubau
2017: 300 MW Zubau
- Zuschlag geht an Investor mit der niedrigsten angebotenen finanziellen Förderung – bis das Volumen ausgeschöpft ist
- Maximal 10 MW/Projekt; 50 € Kautions pro Kilowatt
- Nach 24 Monaten noch kein Betrieb: Kautions als Vertragsstrafe, Verlust der Förderungsberechtigung

Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom

Bereitschaftsvergütung

- Anlagenbetreiber bekommen eine Vergütung (= Leistungspreis) für die Bereitschaft, bei Bedarf Regelenergie zu liefern
- Im Einsatzfall zusätzlich: Arbeitspreis
- Gebotspreise, unterliegen heftigen Marktschwankungen, aber im Allgemeinen über dem Preis für Normalstrom
- Wind und PV sind volatil, deshalb Zusammenschluss mehrerer (> 1000) Anlagen zu virtuellem Kraftwerk (mit weiteren EE, z. B. Biogas, Wasserkraft)
- Koordination über Stromhändler

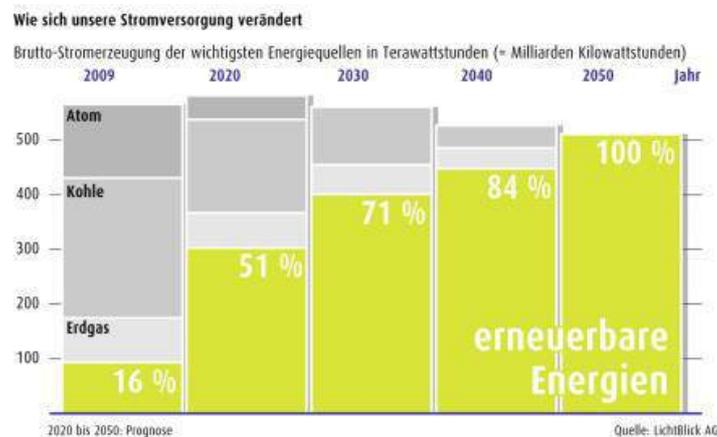


Agenda

- Bisherige Entwicklung der Stromerzeugung und -vermarktung
- Strompreisbildung an der EEX
- Derzeitige Erlösmöglichkeiten für PV- und Windstrom
- Zusammenfassung/Ausblick

Zusammenfassung

- Weiterer Ausbau der EE notwendig zur Erreichung der Klimaziele
- Mittelfristiges Ziel: EE sind wirtschaftlich ohne Subventionen
- Dazu Marktteilnahme zwingend erforderlich
- Regelungen zeigen Erfolge: Anteil der direktvermarkteten Erzeuger nimmt stetig zu
- Zukünftige Entwicklung wird Notwendigkeit weiterer Maßnahmen zeigen





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Quellen

- <http://www.energie-fakten.de/pdf/stromboerse.pdf> [1]
- Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland; Fraunhofer ISE, Fassung vom 25.12.2015 [2]
- <https://www.eex.com/blob/82644/fe99b44aeba444b5328b23b0a2cd2ce4/pr-20150119-eex-jahresrueckblick-data.pdf> [3]
- <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2014/08/2014-08-04-so-funktioniert-der%20strommarkt.html> [4]
- Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2015); BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 11. Mai 2015 [5]
- <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Europaische-und-internationale-Energiepolitik/europaeische-energiepolitik.html> [6]
- <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/direktvermarktung> [7]
- FAQ zur Verordnung für Pilotausschreibungen für Photovoltaik-Freiflächenanlagen; BMWI Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Abruf vom 05.01.2016 [8]

Siliziumkarbid: Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis

Silicon carbide: Power semiconductor device in theory and practice

Georg Schmoll
TU-Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, g.schmoll@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den Vorteilen und Möglichkeiten, die Leistungshalbleiter aus Siliziumkarbid (SiC) gegenüber konventionellen Bauteilen aus Silizium (Si) bieten. Im besonderen Maße wird hierbei auf SiC MOSFET Technologien und SiC Schottky-Dioden eingegangen, welche gegenüber herkömmlichen Si Leistungshalbleitern u.A. eine stark erhöhte kritische Feldstärke, geringere Schaltverluste und damit höhere mögliche Schaltfrequenzen ermöglichen. Sie bieten eine deutlich bessere Performance, besonders bei hohen Temperaturen.

Abstract

This paper deals with the advantages and possibilities that SiC power semiconductor devices provide compared with conventional Si components. In particular is here focused on SiC MOSFET technologies and SiC Schottky-diodes, which possess in comparison with ordinary Si power semiconductor devices among other things a much higher electric breakdown strength, lesser switching losses and make addicted to this higher switching frequencies possible. They provide much better performance, especially at high temperatures.

1 Einleitung

Zum heutigen Stand der Technik haben Leistungshalbleiter aus Silizium, wie etwa MOSFETs oder IGBTs, ihr Entwicklungspotential fast vollständig ausgeschöpft. In modernen Anwendungen die mit Sperrspannungen von 1200V arbeiten, steigt die Nachfrage nach Halbleitern, die geringe statische und dynamische Verluste und gute Leistungswerte bei hohen Temperaturen erzielen. Beispiele hierfür finden sich in der Automobilindustrie oder im Bereich großer PV-Anlagen. Herkömmliche Si-MOSFETs werden nur bis zu einer maximalen Sperrspannung von 800V ausgelegt. IGBTs, die im Bereich höherer Spannung Anwendung finden, werden diesem Anforderungsprofil nicht gerecht. Siliziumkarbid weist als ein „wide-bandgap“ Halbleiter eine Bandlücke auf, die ungefähr 3x so hoch ist wie bei Silizium. Dies ermöglicht es SiC-MOSFETs für Spannungen über 1000V bis zu einigen Kilovolt auszuliegen. Daher wird SiC als Halbleitermaterial für den modernen Markt immer interessanter. Dabei weisen SiC-MOSFETs, welche noch hohes Entwicklungspotential besitzen, schon heute in vielen Anwendungsbereichen bessere Leistungsdaten auf als herkömmliche Si-MOSFETs.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Bandlücke

Eine Quantenmechanische Beschreibung zu den Energiezuständen in einem Festkörper liefert das Bändermodell. Das Pauli-Prinzip verbietet, dass ein Energiezustand mehrfach besetzt werden kann. Dadurch verschmieren nah beieinander liegende Zustände zu sogenannten Energiebändern. Bei ihnen sind die äußeren von besonderer Bedeutung und werden als Valenz- bzw. Leitungsband bezeichnet. [3]

Maßgebend für die Leitfähigkeit des Materials ist hierbei der Abstand, die sogenannte Bandlücke, zwischen diesen beiden Bändern. Bei Isolatoren ist der Abstand groß, bei Leitern liegen die Bänder aufeinander. [3]

Im sperrenden Grundzustand sind in einem Halbleiter nur die Zustände im Valenzband besetzt und es muss thermische und/oder elektrische Energie aufgebracht werden, um Elektronen ins Leitungsband anzuheben. Hierbei bleiben im Valenzband „Löcher“ als positive Ladungsträger zurück. Diese tragen zusammen mit den Elektronen im Leitungsband den Stromfluss. [3]

Die Energie, die benötigt wird um ein Elektron ins Leitungsband anzuheben entspricht der Bandlücke:

$$E_G = E_C - E_V \quad (1)$$

E_C gibt die Energie des Leitungsbandes und E_V die Energie des Valenzbandes an. [3]

Mittig zwischen Leitungs- und Valenzband liegt das Fermi-niveau E_{Fi} . Es gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit im thermischen Gleichgewicht und bei Eigenleitung ein Zustand der Energie E mit einem Elektron besetzt ist. Hierbei gilt die Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion:

$$W_{FD}(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_{Fi})/(kT)}} \quad (2)$$

k bezeichnet die Boltzmann Konstante, während das intrinsische Fermi-niveau E_{Fi} dem Zustand entspricht, der mit einer Wahrscheinlichkeit von genau 50% mit einem Elektron besetzt ist. [3]

2.2 Dotierung

Die freie Ladungsträgerdichte und damit die Leitfähigkeit eines Halbleiters kann durch das Einbringen von „Störstellen“ gezielt beeinflusst werden. Diesen Vorgang nennt man Dotierung. Hierbei werden in den Halbleiterkristall Atome eingebracht, die entweder ein Valenzelektron mehr oder weniger haben als der Halbleiterkristall mit 4 Valenzelektronen. [3] Werden Atome mit 5 Valenzelektronen eingebracht, so wird das 5. Elektron nicht für eine Bindung im Kristallgitter benötigt. Es kann als quasi „freier Ladungsträger“ durch Zuführung einer kleinen Energiemenge am Ladungstransport teilnehmen. Solche Fremdatome werden als Donatoren mit der Dichte N_D bezeichnet. Durch Einbringen solcher Atome verschiebt sich die Lage des Fermi-niveaus in Richtung des Leitungsbandes um den Betrag:

$$E_F - E_{Fi} = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad (3)$$

mit n_i als intrinsische Ladungsträgerdichte.

Umgekehrt entstehen bei Atomen mit 3 Valenzelektronen „Löcher“ die von Elektronen besetzt werden können und somit zum Ladungstransport beitragen können. Solche Fremdatome werden als Akzeptoren der Dichte N_A bezeichnet. Durch Einbringen solcher Atome verschiebt sich die Lage des Fermi-niveaus in Richtung des Valenzbandes um den Betrag:

$$E_F - E_{Fi} = kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (4)$$

Abbildung 1 zeigt, dass sich das Dotierniveau für Donatoren knapp unterhalb der Leitungsbandkante befindet (links), während das Dotierniveau für Akzeptoren knapp oberhalb der Valenzbandkante liegt (rechts). [3]

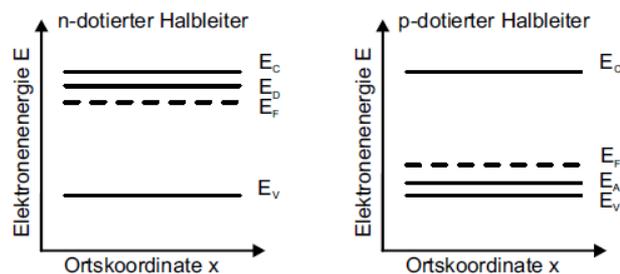


Abbildung 1 Bändermodelle des dotierten Halbleiters [3]

2.3 Der pn-Übergang

An der Grenzschicht zwischen einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiter befindet sich ein pn-Übergang. Dadurch, dass das Fermi-niveau im p-dotierten und im n-dotierten Bereich auf gleicher Höhe liegt, kommt es zu einer Verbiegung der Leitungs- und Valenzbandkanten. Das Bändermodell für solch einen Übergang zeigt Abbildung 2. [3]

Aufgrund der Dotierung befindet sich auf der p-dotierten Seite eine hohe Löcherkonzentration, während auf der n-dotierten Seite eine hohe Elektronenkonzentration vorliegt. Dieses Konzentrationsgefälle hat einen Diffusionsstrom zur Folge. Allerdings baut sich durch die räumliche Trennung von Elektronen und Löchern ein elektrisches Feld auf, welches diesem Strom entgegenwirkt. Hierdurch stellt sich ein Gleichgewicht ein, das die Diffusionsvorgängen auf den Bereich zwischen $-x_p$ und x_p einschränkt. Dieser Bereich wird Verarmungszone (oder auch Raumladungszone oder Sperrschicht) genannt. In ihr befindet sich eine verringerte Konzentration von freien Ladungsträgern. Das Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen führt zu einer Differentialgleichung, deren Lösung die Diffusionsspannung U_D bei vollständiger Ionisation der Störstellen über der Raumladungszone liefert:

$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A^- N_D^+}{n_i^2} \right) \quad (5)$$

Hierbei sind e die Elementarladung, N_A^- und N_D^+ bezeichnen die Dichten der ionisierten Dotieratome [3]. Im Bändermodell entspricht diese Diffusionsspannung gerade der Bänderverbiegung. Das Anlegen einer externen Spannungsquelle U_{Ext} verstärkt oder reduziert je nach Polarität die Bandverbiegung. In Sperrrichtung (+ an der n-dotierten Seite, - an der p-dotierten Seite) steigt die Potentialbarriere und der Diffusionsstrom kommt zum Erliegen. Übrig bleibt dann der sehr kleine auf Minoritätsladungsträger beruhende Feldstrom. In Durchlassrichtung (+ an der p-Seite, - an der n-Seite) werden die Energiebarriere und damit die Verarmungszone reduziert und der Diffusionsstrom steigt exponentiell mit der angelegten Spannung an, während der Feldstrom hierbei weitestgehend unverändert bleibt. Dadurch ergibt sich die Gesamtstromstärke in Abhängigkeit der angelegten externen Spannung zu:

$$j(U_{Ext}) = \left(\frac{eD_n n_i^2}{N_A L_n} + \frac{eD_p n_i^2}{N_D L_p} \right) \left(e^{\frac{eU_{Ext}}{kT}} - 1 \right) \quad (6)$$

wobei die Diffusionskonstante D angibt, wie gut sich ein Teilchen durch den Kristall bewegen kann und L die Diffusionslänge von Elektronen/Löchern angibt. [3]

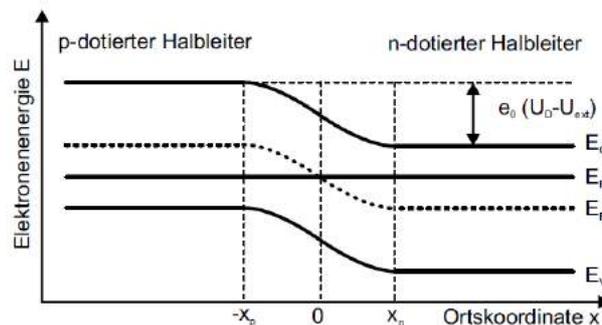


Abbildung 2 pn-Übergang im Bändermodell [3]

2.4 Der Metall-Halbleiter Kontakt

Dieser Übergang weist bei geeigneter Dotierung eine ähnliche Strom-Spannungs Charakteristik wie der pn-Übergang auf. Um einen Schottky Kontakt zu erhalten, muss die Austrittsenergie eines Elektrons bei einem n-Halbleiter geringer sein, als bei einem Metall. Hierbei dient die Austrittsenergie vom Fermi-niveau ins Vakuum als Bezugsgröße. Im Metall befindet sich das Fermi-niveau an der Oberkante des Leitungsbandes. Am Metall-Halbleiter Kontakt entsteht am Halbleiter eine Verarmungszone und am Metall eine negative Anreicherungszone. Da aufgrund der unterschiedlichen Austrittsenergien bei der Kontaktierung zunächst mehr Elektronen in das Metall gelangen als in den Halbleiter. Dies führt zu einer Verbiegung der Bandkanten im Halbleiter. Abbildung 3 zeigt einen typischen Verlauf des Bändermodells bei einem Schottky Kontakt. Der resultierenden Potentialunterschied zwischen Metall und Halbleiter wird als Kontaktspannung U_K bezeichnet und lässt sich über die Differenz der Austrittsarbeiten berechnen:

$$U_K = \frac{W_{Me} - W_{Hl}}{e} \quad (7)$$

Wird eine negative Spannung über den Schottky-Kontakt angelegt (durch Anlegen des positiven Pols an den Halbleiter), so ist dieser in Sperrrichtung geschaltet. Der Grund hierfür ist, dass das Fermi-niveau auf Halbleiterseite absinkt und sich die Potentialbarriere auf der Halbleiterseite somit vergrößert. Hierdurch gelangen weniger Elektronen vom Halbleiter in das Metall, bis dieser Elektronenfluss bei ausreichend hoher Spannung komplett zum Erliegen kommt. Auf der Metallseite hingegen ändert sich die Potentialbarriere Φ_M nicht, wodurch sich der Elektronenfluss vom Metall in den Halbleiter nur unwesentlich verändert. [3]

Wird hingegen eine positive Spannung angelegt, wird das Fermi-niveau im Halbleiter angehoben und die Potentialbarriere auf Halbleiterseite wird verkleinert. Hierdurch gelangen nun mehr Elektronen vom Halbleiter in das Metall und der Schottky-Kontakt wird leitend.

Der Gesamtstrom über den Schottky Kontakt errechnet sich zu:

$$j(U_{Ext}) = A^* T^2 e^{-\frac{e\Phi_M}{kT}} \left(e^{\frac{eU_{Ext}}{kT}} - 1 \right) \quad (8)$$

Hierbei ist der Faktor A^* die materialabhängige effektive Richardson-Konstante, die für Silizium $110 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ und für 4H-SiC $148 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ beträgt. [3]

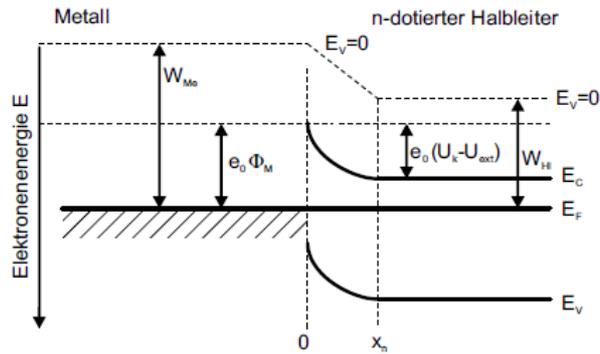


Abbildung 3 Bändermodell des Schottky-Kontakts [3]

3 Hauptteil

3.1 Vergleich der Materialeigenschaften von Si und SiC

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der wichtigsten Materialeigenschaften von Si und SiC auf. SiC besitzt einen Bandabstand, der dem von Si gegenüber ungefähr 3x so hoch ist. Dies hat die um das etwa 10-fache gesteigerte Durchbruchfeldstärke von SiC zur Folge. Somit ist es u.A. möglich bei SiC MOSFETs die Driftzonen, in denen der Ladungstransport stattfindet, auf ein Zehntel der Länge von Si MOSFETs zu verringern. Hierdurch wird der Eingangswiderstand trotz geringerer Elektronenbeweglichkeit erheblich reduziert, was für SiC MOSFETs sehr hohe Schaltfrequenzen oder sehr geringe Schaltverluste ermöglicht. [5]

Für pn-Dioden auf SiC Basis hingegen würde der hohe Bandabstand zu sehr hohen Schwellenspannungen bis zu 2,8V führen. Im Vergleich dazu liegen sie bei Si pn-Dioden (abhängig von der Sperrspannung) bei ca. 0,7V bis knapp mehr als 1V. Daher sind SiC pn-Dioden keine Alternative zu gebräuchlichen Si pn-Dioden. Diesen Nachteil kann man durch Verwendung von SiC Schottky-Dioden umgehen, da hier die Schwellenspannung durch das verwendete Metall beeinflusst werden kann. Bei geeigneter Wahl lässt sich somit für diese ein Wert von ca. 0,9V erreichen, welcher im akzeptablen Bereich liegt. [1, 4]

Ein weiterer Vorteil von SiC Leistungshalbleitern ist die hohe Wärmeleitfähigkeit. Diese ermöglicht es, dass Verlustwärme gut abgeführt werden kann. SiC Halbleiter können somit für sehr viel höhere Leistungsdichten ausgelegt werden, als ihre Gegenstücke auf Si Basis. Zudem können externe Kühlungen wesentlich platz- und kostensparender dimensioniert werden. [4]

	Si	SiC
Bandabstand[eV]	1,12	3,26
Wärmeleitfähigkeit[W/cmK]	1,5	4,9
Elektronenbeweglichkeit[10 ³ cm ² /Vs]	1400	900
Durchbruchfeldstärke[MV/cm]	0,3	3

Tabelle 1 Materialeigenschaften von Si und SiC [4]

3.2 Vergleich: SiC Schottky-Diode gegenüber Si pn-Diode

Die Durchbruchfeldstärke von SiC ist ungefähr 10x so hoch wie die von Si. Dies ermöglicht es, die Raumladungszone bei SiC Schottky-Dioden ungefähr 10x dünner auszulegen als bei Si pn-Dioden (siehe Abbildung 4). Hierdurch kann ein deutlich geringerer spezifischer Widerstand erzielt werden. Bei gleicher Spannungsauslegung ist er etwa um den Faktor 500 geringer. Ebenso besitzen SiC Schottky-Dioden hierdurch eine wesentlich geringere Sperrschichtkapazität, wodurch auch beim Schaltvorgang wesentlich weniger Energie zum Laden und Entladen dieser aufgewendet werden muss. Andererseits kann bei gleichem Widerstand eine Sperrspannung erzielt werden, die um eine Zehnerpotenz höher liegt. Durch diese Eigenschaften weisen SiC Schottky-Dioden gegenüber Si pn-Dioden ein wesentlich besseres Schaltverhalten im Bereich Schaltfrequenz und -Verlusten auf. [1]

Zusätzlich weist der spezifische Widerstand von SiC einen positiven Temperaturkoeffizienten auf, hierdurch ist es mög-

lich SiC Schottky-Dioden parallel zu schalten, ohne das ein „thermisches Durchgehen“ möglich ist. Dies liegt daran, dass mit steigender Temperatur der Widerstand zunimmt und dadurch automatisch der Stromfluss in dem Element abnimmt, das aktuell die höchste Temperatur aufweist. Hierdurch reguliert sich in einer Parallelschaltung die Stromverteilung gewissermaßen von selbst. [4]

SiC Schottky-Dioden weisen eine hohe Temperaturfestigkeit auf. Sie können für Sperrschichttemperaturen deutlich oberhalb von 200°C ausgelegt werden. Diese Temperaturen können bei Si Dioden zum Defekt führen. Auch dies ist ein Grund, warum SiC Dioden für verglichen hohe Leistungen ausgelegt werden können. [1]

Allerdings haben SiC Schottky-Dioden auch Nachteile. So sind sie allgemein aufwändiger und teurer herzustellen als herkömmliche Si Dioden. Zudem wird durch die hohe Durchbruchfeldstärke eine wesentlich höhere Energiebarriere beim Schottky Kontakt benötigt, um Sperrströme zu verhindern. [14]

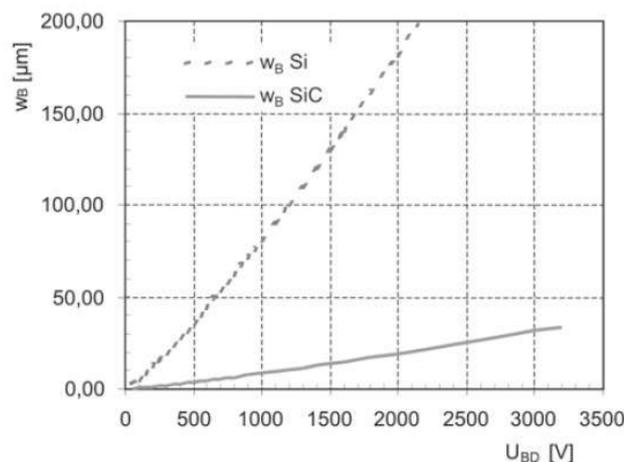


Abbildung 4 Weite der Raumladungszone für Si und SiC [1]

3.3 Vergleich: SiC MOSFET gegenüber Si MOSFET und IGBT

Da bei Si MOSFETs der spezifische Einschaltwiderstand sehr schnell mit der Durchbruchspannung ansteigt, werden diese für gewöhnlich nur für Spannungen bis zu maximal 800V ausgelegt. Für Spannungen darüber hinaus werden IGBTs verwendet. Sie haben den Nachteil, dass beim Ausschaltvorgang ein sogenannter „Tail-Strom“ auftritt, der vergleichsweise hohe Schaltverluste zur Folge hat. Dieser Effekt wird mit steigender Temperatur noch ausgeprägter. Daher werden IGBTs üblicherweise auf Schaltfrequenzen für maximal 20kHz bis 40kHz eingesetzt, um die entstehende Verlustwärme zu begrenzen. [12]

Diese Nachteile weisen SiC MOSFETs nicht auf. Sie können heute bei Spannungen bis 1700V eingesetzt werden, Auslegungen bis zu einigen Kilovolt sind möglich. Hierbei profitieren sie vor allem von den herausragenden Schalteigenschaften und können gegenüber IGBTs erheblich geringere Schaltverluste aufweisen. Dies ermöglicht es auch, SiC MOSFETs für Schaltfrequenzen bis zu 100kHz auszulegen. Hierdurch wird auch die Verwendung kleinerer Induktivitäten und Kondensatoren möglich. Einen exemplarischen Vergleich der Größenordnungen bei Verwendung von SiC MOSFETs und Si IGBTs liefert Abbildung 5. [12]

Doch auch gegenüber Si MOSFETs bieten sich weitere Vorteile. So ermöglicht die hohe Durchbruchfeldstärke eine sehr dünne, hoch dotierte Driftschicht. Hierdurch ist der spezifische Drift- und damit der gesamte Einschaltwiderstand erheblich geringer, da dieser, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, sich nach folgender Formel berechnen lässt:

$$R_{Drift} = \frac{d}{q\mu_n N_D} \quad (9)$$

mit d als Schichtdicke, μ_n als Elektronenbeweglichkeit und N_D als Dotierungsdichte. Die geringe Schichtdicke und die hohe Dotierung senken den Widerstand enorm und machen die geringere Elektronenbeweglichkeit mehr als wett. Auf der anderen Seite lassen sich bei gleicher Widerstandsauslegung wesentlich kleinere Chipflächen erzielen. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Einschaltwiderstand von SiC MOSFETs kaum mit der Temperatur steigt, während er bei Si MOSFETs sich bei 150°C fast verdoppelt. [4, 5]

Zur Zeit gelten Si MOSFETs für Spannungen bis 200V aufgrund ihrer höheren Elektronenbeweglichkeit und niedrigerer threshold Spannung SiC MOSFETs gegenüber als überlegen. Erst bei höheren Spannungen überwiegen die Vorteile von SiC MOSFETs. Daher werden sie vor allem für Anwendungen über 600V genutzt. [13]

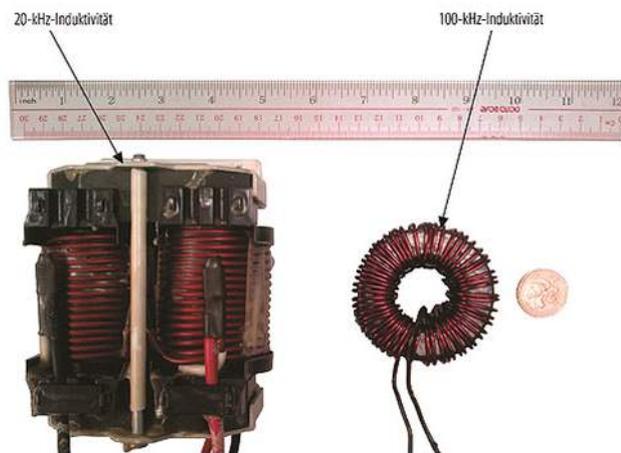


Abbildung 5 Größenvergleich zwischen 5kW Drosseln [12]

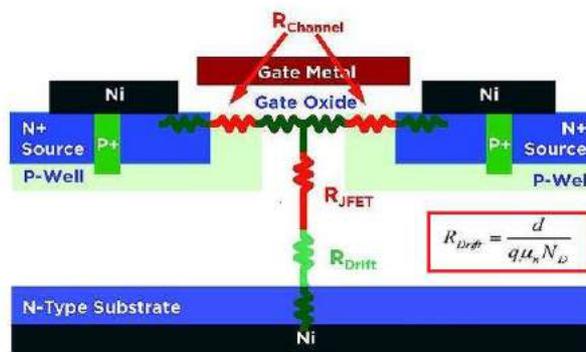


Abbildung 6 Widerstände in einem MOSFET [5]

3.4 SiC Leistungshalbleiter in der Praxis

2002 stellte CREE die erste 600V SiC Schottky-Diode vor. Ihr Einsatz in Schaltnetzteilen machte die Blindleistungskompensation wesentlich effizienter. Außerdem verbesserte ihr Einsatz in PV-Wechselrichtern die Amortisationszeit von Solaranlagen. Heutige SiC Dioden sind für Spannungen von 600V bis 1200V und Trageströme von 5A bis 40A ausgelegt. Dioden für Höhere Spannungen und Ströme sind in Entwicklung. Sie finden vor allem dann Anwendung, wenn hohe Spannungen und eine hohe Schaltfrequenz gefordert sind. [11]

Anfang 2011 wurden erste SiC MOSFETs kommerziell verfügbar. Heutige Modelle sind für Spannungen von 900V, 1200V und 1700V ausgelegt, eine Dimensionierung bis zu einigen Kilovolt ist möglich. Betrieben werden sie bei Strömen bis 40A und Schaltfrequenzen bis 100kHz. Anwendung finden sie vor allem in der Elektromobilität, in Wechselrichtern für den PV-Bereich und anderer erneuerbarer Energien, oder auch für Industrienetzteile. Hierbei erzielen sie Wirkungsgrade bis zu 99%. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist der Einsatz in Hilfsstromversorgungen für Eisenbahnfahrzeuge, wo sie gegenüber herkömmlichen Si Anwendungen Gewichts- und Volumeneinsparungen von 30-60% gewährleisten. [10, 12]

4 Kritische Würdigung

Siliziumkarbid spielt für moderne Halbleiterleistungsbaulemente eine große Rolle. So wurde in den letzten 10 Jahren intensiv an neuen Bauelementen auf SiC Basis geforscht. Dies liegt daran, dass die Grenzen für Si Leistungshalbleiter fast ausgeschöpft sind, während die moderne Industrie immer höhere Ansprüche an Leistungshalbleiter stellt. Daher war es notwendig, neue Materialien für Leistungshalbleiter in Betracht zu ziehen, wobei sich SiC als das vielversprechendste

herausstellte. Durch seine vielen Vorzüge besonders im Bereich hoher Spannungen, Schaltfrequenzen und Leistung wird SiC auch in Zukunft eine Zentrale Rolle in der Forschung an Leistungshalbleitern spielen. Daher ist dieses Thema für den Vortrag eine gute und zeitgemäße Wahl.

5 Zusammenfassung und Fazit

Siliziumkarbid zeichnet sich als Halbleitermaterial besonders durch seine hohe Bandlücke aus. Hierdurch ergeben sich für MOSFETs und Schottky-Dioden auf SiC Basis besonders im Bereich hoher Spannungen einige signifikante Vorteile ihren Si Pendanten gegenüber. So ist es möglich SiC MOSFETs in Spannungsbereichen einzusetzen, in denen bisher auf Si Basis nur IGBTs Anwendung fanden. Hierbei zeichnen sie sich durch ihre geringen Schaltverluste bei hohen Schaltfrequenzen aus.

Im gleichen Maße zeichnen sich auch SiC Schottky Dioden durch gutes Schaltverhalten bei hohen Sperrspannungen aus. Zudem weisen Leistungshalbleiter auf SiC Basis eine sehr gute Performance bei hohen Temperaturen auf, wodurch sie auch für hohe Leistungsdichten verwendet werden können.

SiC Leistungshalbleiter bieten schon jetzt im Bereich hoher Spannung und Frequenz erhebliche Vorteile gegenüber Si Leistungshalbleitern, obwohl sie sich in einem noch sehr frühen Entwicklungsstadium befinden. Dadurch kann man erwarten, dass sie speziell in diesem Bereich in Zukunft einen Markt finden und hier gegenwärtige Lösungen auf Si Basis wohl möglich verdrängen werden. Da das Entwicklungspotential hoch ist, bleibt abzuwarten, in wie weit SiC MOSFETs auch im Spannungsbereich unter 600V sich gegenüber Si MOSFETs durchsetzen können.

6 Literatur

- [1] J. Lutz, Halbleiterleistungsbaulemente - Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, SEMIKRON Applikationshandbuch Leistungshalbleiter, Ilmenau: ISLE Verlag, 2010.
- [3] W.-T. Franke, Dissertation - Vergleich von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern und ihre Anwendung in einem wirkungsgradoptimierten PV-Wechselrichter, Harrisle, 2013.
- [4] A. Gillhuber, WEKA FACHMEDIEN GmbH, SiC - Das Material und seine Eigenschaften, 14.05.2014, <http://www.elektroniknet.de/power/sonstiges/artikel/108808/> [Zugriff am 15.01.2016].
- [5] P. Kierstead, WEKA FACHMEDIEN GmbH, Siliziumkarbid MOSFETs - Verbesserte zweite Generation, 07.01.2014, <http://www.elektroniknet.de/halbleiter/leistungshalbleiter/artikel/104393/> [Zugriff am 15.01.2016].
- [6] I. Koch, F. Hinrichsen, TU-Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Siliziumkarbid - Halbleiterschalter, 2004, https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/imab/09-Jahresberichte/2004/06_Koch-Hinrichsen_2004.pdf [Zugriff am 17.01.2016].
- [7] I. Koch, TU-Braunschweig, Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen, Vergleich von Si- und SiC-Halbleitern, 2007, https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/imab/09-Jahresberichte/2007/08_Koch_2007.pdf [Zugriff am 07.12.2015].
- [8] SEMIKRON, Siliziumkarbid-Module - Die führende Chip- und Gehäusetechnologie für höchste Energieeffizienz, 2015, <http://www.semikron.com/de/innovation-technologie/siliziumkarbid-module.html> [Zugriff am 07.12.2015].
- [9] H. Föll, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Technische Fakultät, MaWi 2 - Skript, http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw2_ge/index.html [Zugriff am 17.01.2016].
- [10] D. Liesabeths, CREE, In welchen Bereichen SiC-MOSFETs Vorteile bieten, 07.05.2015, <http://www.all-electronics.de/in-welchen-bereichen-sic-mosfets-vorteile-bieten/> [Zugriff am 17.01.2016]
- [11] G. Kucera, Elektronikpraxis, Vom Pizza-Boten zum Siliziumkarbid-Visionär <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/opto/articles/465890/index3.html> [Zugriff am 17.01.2016]
- [12] J. Liu, K. L. Wong, S. Allen, J. Mookken, WEKA FACHMEDIEN GmbH, Wie leistungsfähig sind SiC-MOSFETs?, 02.10.2013, <http://www.elektroniknet.de/power/sonstiges/artikel/101701/> [Zugriff am 18.01.2016].
- [13] M. Ruff, H. Mitlehner, R. Helbig, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 41, NO. 6, 1994
- [14] K. Okumura, N. Hase, K. Ino, T. Nakamura, M. Tanimura, PCIM Europe - Ultra Low Ron SiC Trench Devices, Nuremberg, 2012



Siliziumkarbid: Ein Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis

Georg Schmall, 25.01.2016

Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick

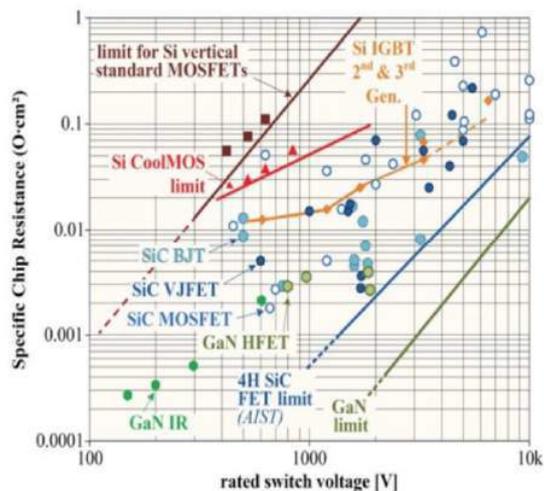


Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick

Einleitung

- Siliziumkarbid (SiC) gilt als der Halbleiter der Zukunft
- Enorm hohes Entwicklungspotential vorhanden
- Von besonderem Interesse sind neben SiC Schottky-Dioden hierbei SiC-MOSFETs
- Diese „kombinieren“ die Stärken von Si-MOSFETs und -IGBTs
- Und weisen dabei schon heute in vielen Bereichen besseres Schaltverhalten als Si-MOSFETs auf

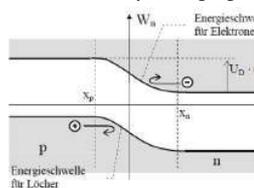


Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick

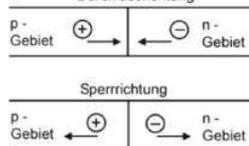
pn-Diode

Bändermodell: pn-Übergang



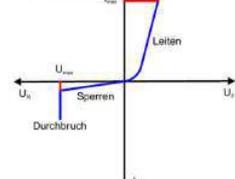
ProfG02

pn-Übergang in Durchlass- und Sperrrichtung



HLB13

IU-Kennlinie



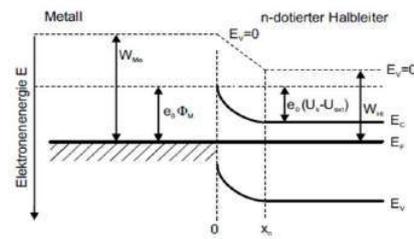
DisFran13

- Halbleiter-Halbleiter Kontakt
- Übergang von p-dotierten zu n-dotierten Halbleiter
- Positive Spannung am p-Gebiet gegenüber dem n-Gebiet sorgt für Leitfähigkeit (Durchlassrichtung)
- Negative Spannung am p-Gebiete gegenüber dem n-Gebiet verhindert Stromfluss (Sperrrichtung)
- Kleine Sperrströme treten auch in Sperrrichtung auf
- Zu hohe Spannung in Sperrrichtung führt zum „Durchbruch“
- Diodenkennlinie

Schottky-Diode

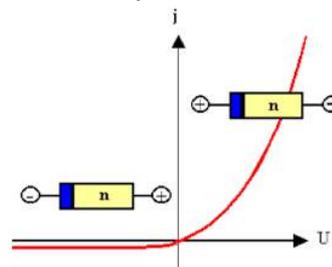
- Metall-Halbleiter Kontakt
- Bei n-dotierten Halbleitern muss die Austrittsenergie des Halbleiters geringer sein als die des Metalls
- Eine positiven Spannung am HL führt zu einem „Rückwärtsstrom“, der fast spannungsunabhängig ist
- Eine negative Spannung am HL führt zu einem Strom der exponentiell mit der Spannung ansteigt
- Diodenkennlinie

Bändermodell Schottky Kontakt



DisFran13

Kennlinie Schottky-Diode

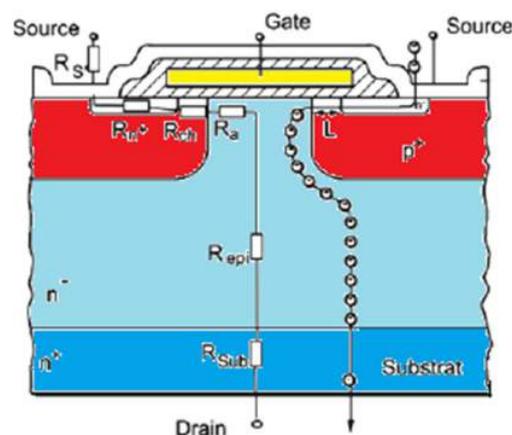


Unik6.3

Der MOSFET

- Erst bei angelegter Gatespannung wird ein MOSFET leitend (normally off)
- Ein schnelles Umschalten zwischen leitend und nicht leitend ist möglich
- MOSFETs eignen sich hervorragend für schnelle und verlustarme Schaltvorgänge
- Bei Si MOSFETs steigt der spezifische Einschaltwiderstand stark beim Erhöhen der Durchbruchspannung
- Die Verwendung von Si MOSFETs ist nur für Spannung bis max. 800 V sinnvoll

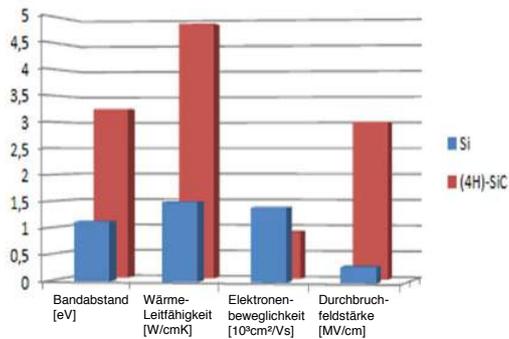
Strompfad in einem vertikalen MOSFET



HLB13

Vergleich: Materialeigenschaften von Si gegenüber SiC

Diagramm: Materialeigenschaften



- Bandabstand ca. 3x so hoch
- Um das 10-fache gesteigerte Durchbruchfeldstärke
- Mehr als das 3-fache der Wärmeleitfähigkeit
- Geringere Elektronenbeweglichkeit (ca. 2/3 im Vgl. zu Si)

Resultierend für den SiC Leistungshalbleiter

- SiC Bauelemente können für deutlich höhere Sperrspannungen ausgelegt werden
- Die große Bandlücke würde bei pn-Dioden zu hohen Schwellenspannungen bis 2,8 V führen
- Verwendung von SiC Schottky-Dioden (Schwellenspannung hier ca. 0,9 V)
- „Driftzonen“ in MOSFETs können deutlich verkleinert werden
- Trotz geringerer Elektronenbeweglichkeit ist der Durchgangswiderstand wesentlich geringer
- Schaltverluste sind erheblich reduziert
- Oder höhere Schaltfrequenzen möglich
- Hohe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht kosten- und platzsparende externe Kühlungen

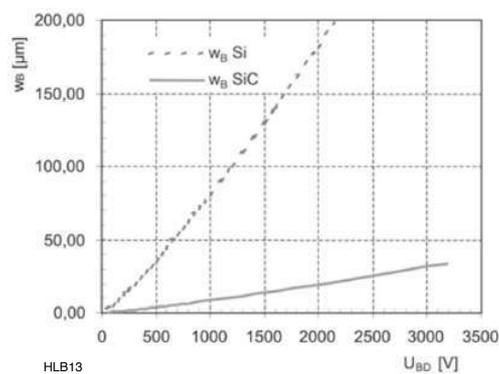
Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick

SiC-Schottky Diode vs Si pn-Diode I

- SiC hat gegenüber Si eine 10x so hohe Durchbruchfeldstärke
- Die SiC Diode kann um das 10-fache dünner gemacht werden
- Eine deutlich höhere Dotierung kann erzielt werden
- Der spezifische Widerstand ist wesentlich geringer. Bei gleicher Spannungsauslegung ist er ungefähr um den Faktor 500 geringer
- Bei gleichem Widerstand kann eine um eine Zehnerpotenz höhere Sperrspannung erzielt werden
- Schaltverluste sind deutlich reduziert, besonders bei hohen Spannungen

Weite der Raumladungszone für Si und SiC



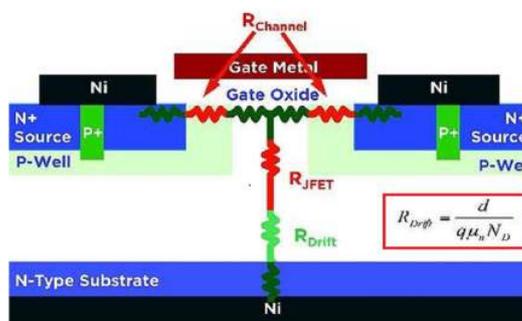
SiC-Schottky Diode vs Si pn-Diode II

- Der Einschaltwiderstand weist einen positiven Temperaturkoeffizient auf
- Kein „Thermisches Durchgehen“ möglich bei parallel geschalteten SiC Dioden
- SiC Dioden können für Sperrschichttemperaturen deutlich oberhalb von 200 °C ausgelegt werden
- Eine deutliche Erhöhung der Leistungsdichte in Leistungsbauerelementen ist möglich
- Allerdings sind die Dioden im Allgemeinen aufwändiger und teurer herzustellen als herkömmliche Si Dioden
- Zudem wird durch die hohe Durchbruchfeldstärke eine deutlich höhere Energiebarriere beim Schottky-Kontakt benötigt um Sperrströme zu verhindern
- Dennoch sind SiC Schottky-Dioden Anwendungen, die sehr hohe Schaltfrequenzen erfordern, aufgrund der vorher genannten Vorteile, herkömmlichen Si pn-Dioden überlegen
- Kompensiert den allgemein höheren Aufwand und Preis der SiC Dioden

SiC MOSFET vs Si MOSFET

- Si MOSFETS werden für Sperrspannungen bis maximal 800 V ausgelegt
- Höhere Spannungsauslegen wäre technisch denkbar aber unwirtschaftlich
- SiC MOSFETs können schon heute bis maximal 1700 V ausgelegt werden
- Das Entwicklungspotential liegt hierbei bei einigen Kilovolt

Widerstände in einem MOSFET



ENET2

- Die hohe Durchbruchfeldstärke ermöglicht eine dünne, hoch dotierte Driftschicht
- Der spezifische Drift- und damit ist der $R_{DS,on}$ gegenüber Si MOSFETs wesentlich geringer
- Bei gleichem Widerstand werden deutlich kleinere Chipflächen möglich
- Zudem ist der Einschaltwiderstand kaum temperaturabhängig, während er sich bei Si MOSFETs bei 150 °C fast verdoppelt
- Allerdings weisen herkömmliche Si MOSFETs für Anwendungen bis 200 V einen geringeren $R_{DS,on}$ auf

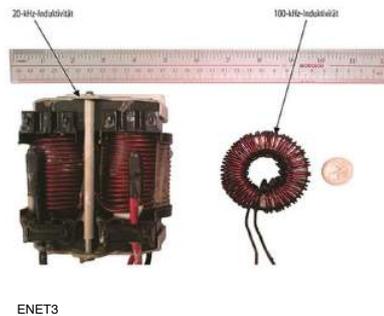
SiC MOSFET vs Si IGBT

- IGBTs wurden bisher bei Anwendungen für Spannungen über 600 V verwendet
- Das auftreten eines „Tail-Stroms“ beim Abschalten sorgt für hohe Schaltverluste
- Bei steigender Temperatur wird dieser Effekt noch ausgeprägter
- SiC MOSFETs können im selben Spannungsbereich betrieben werden
- Das fehlen eines solchen „Tail-Stroms“ bei MOSFETs sorgt hierbei für
 - Geringer Schaltverluste oder
 - Höhere mögliche Schaltfrequenz
- Zudem können passive Bauelemente und Kühlsysteme hierdurch kleiner dimensioniert werden

Tabelle1: Exemplarischer Vergleich für eine 5-kW-Drossel

	SiC MOSFET	Si IGBT
Schaltfrequenz [kHz]	100	20
Abmessungen [mm]	D:63 H:26	140x108x68
Referenzpreis [\$]	12	31

Größenvergleich zwischen 5-kW-Drosseln



Ergebnisse

- SiC Schottky-Dioden und MOSFETs zeichnen sich besonders im Spannungsbereich von 800V+ durch ihre hervorragenden Schalteigenschaften aus
- Sie bieten eine gute Alternative zu den bisher verwendeten Si pn-Dioden und IGBTs
- Somit erweitert SiC den Anwendungsbereich von MOSFETs auf über 1 kV
- Der geringere Einfluss der Temperatur ermöglicht einfachere Kühlungen und erhöht die möglichen Leistungsdichten in Leistungsbaulementen
- Im Bereich bis 200 V haben Si-MOSFETs die besseren Eigenschaften
- SiC MOSFETs finden derzeit vor allem für Spannungen über 600 V einen Markt

Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick

SiC Schottky Diode in der Praxis

- 2002 stellte CREE die erste 600 V SiC Schottky-Diode vor
 - Ihr Einsatz in Schaltnetzteilen machte die Blindleistungskompensation wesentlich effizienter
 - Außerdem verbesserte sie die Amortisationszeit von Solaranlagen
- Heutige SiC-Dioden sind für Sperrspannungen von 600-1200 V und Trageströmen von 5-40 A ausgelegt
 - Ausführungen für höhere Ströme und Spannungen bis 1700 V sind in Entwicklung
 - Sie finden heute vor allem für hohe Spannungen und wenn eine hohe Schaltfrequenz erfordert wird Anwendung
 - Zum Beispiel für Schaltnetze oder PV-Anlagen



INF15

Entwicklung des SiC MOSFETs I

- Schon Ende der 1980er Jahre wurde von CREE ein funktionsfähiger SiC-MOSFET entwickelt
- Allerdings nur um die Fähigkeiten des SiC-Halbleiters zu demonstrieren
- Der Herstellungsprozess von SiC MOSFETs war jedoch zeitaufwendig und teuer
- Zudem waren die Methoden zur SiC-Kristallzucht langsam und hatten relativ viele Kristalldefekte zur Folge
- Die Entwicklung von SiC-Bauelementen eingestellt, da sie aufgrund ihres teuren und komplizierten Herstellungsprozesses als nicht wirtschaftlich galten
- Letztlich wurde das Herstellungsverfahren für Si-MOSFETs und –IGBTs über die Zeit nahezu perfektioniert und diese genügten lange den Anforderungen
- Deshalb war es nicht nötig weiter an SiC-MOSFETs zu forschen

Entwicklung des SiC MOSFETs II

- Seit nun mehr als 10 Jahren wird allerdings wieder intensiv an SiC als Halbleitermaterial geforscht
- So wurden inzwischen u.A. bessere Methoden zur Kristallzucht entwickelt und der Herstellungsprozess im Allgemeinen effizienter gestaltet
- Hierdurch und wegen der gestiegenen Anforderungen an die heutige Leistungselektronik wurden SiC Bauelemente wirtschaftlich
- 2011 waren erste SiC-MOSFETs kommerziell verfügbar
- Anfang 2013 erschien die 2. Generation von SiC-MOSFETs, die eine nochmal deutlich verbesserte Leistungscharakteristik aufweisen

SiC MOSFET in der Praxis

- In Anwendung sind hauptsächlich SiC MOSFETs für Spannungen von 900, 1200 und 1700V
- Ausgelegt sind sie für Ströme von bis zu 50 A und Schaltfrequenzen bis 100 kHz
- Anwendung finden sie vor allem in der Elektromobilität, in Wechselrichtern für den PV-Bereich sowie anderer erneuerbarer Energien oder auch für Industrienetzeile
- Hierbei erzielen sie durch ihre herausragenden Schalteigenschaften Wirkungsgrade von bis zu 99%
- Und können z.B. bei Hilfsstromversorgungen für Eisenbahnfahrzeuge Gewichts- und Volumeneinsparungen von 30-60% bewirken

Weitere SiC Leistungshalbleiter

- SiC JFETs
- SiC Bipolartransistoren
- Topologie und der Herstellung einfacher als MOSFETs
- Auf Si Basis spielen JFETs und Bipolartransistoren aufgrund komplexerer Ansteuerung und schlechteren elektrischen Eigenschaften in der heutigen Leistungselektronik keine Rolle mehr
- Auf SiC Basis treten allerdings einige bekannte Nachteile schwächer bis gar nicht in Kraft
- JFETs und Bipolartransistoren könnten in der Leistungselektronik wieder relevant werden

Agenda

- Einleitung
- Theorie
- Vergleich existierender Halbleiter
- SiC Leistungshalbleiter in der Praxis
- Zusammenfassung + Ausblick



18.01.2016 | Georg Schmall | Siliziumkarbid: Ein Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis | Seite 23



Zusammenfassung

- SiC zeichnet sich durch eine sehr hohe Bandlücke aus
- Dies hat für SiC MOSFETs und Schottky-Dioden besonders im Bereich hoher Spannung einige Signifikante Vorteile ihren Pendanten auf Si Basis gegenüber zur Folge
- Z.B. der Einsatz von SiC MOSFETs in Spannungsbereichen, in denen auf Si Basis hauptsächlich IGBTs Verwendung fanden
- Hierbei zeichnen sie sich vor allem durch ihre geringen Schaltverluste bei hohen Frequenzen aus
- Seit nun mehr als 10 Jahren finden SiC Leistungshalbleiter praktische Anwendung und ihre Leistungsdaten wurden durch intensivierte Forschung stetig verbessert



18.01.2016 | Georg Schmall | Siliziumkarbid: Ein Leistungshalbleiter in Theorie und Praxis | Seite 24



Ausblick

- Trotz ihres noch sehr frühen Entwicklungsstandes weisen SiC Halbleiter schon heute für hohe Spannungen und Leistungen teils erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Si Bauelementen auf
- So werden besonders in diesem Bereich SiC MOSFETs und Schottky-Dioden einen Markt finden und in starker Konkurrenz zu Si IGBTs und pn-Dioden stehen und könnten diese evtl. langfristig aus diesem markt verdrängen
- Für Anwendungen in denen eine besonders kompakte Bauform gefordert sind bieten SiC Halbleiter Vorteile und werden sich hierfür wohl etablieren
- Allerdings muss noch viel in die Entwicklung von SiC Bauelemten investiert werden damit die Reife heutiger Si Halbleiter zu erreichen

Quellen

- **DisFran13:** W.-T. Franke, Dissertation- Vergleich von Siliziumkarbid-Leistungshalbleitern und ihre Anwendung in einem wirkungsgradoptimierten PV-Wechselrichter, Harrisle, 2013
- **ProfG02:** <http://prof-gossner.eu/pdf/02-pn-Uebergang.pdf>
- **HLB13:** J. Lutz, Halbleiterleistungsbauelemente - Physik,Eigenschaften,Zuverlässigkeit, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012
- **UniK6.3:** http://www.tf.unikel.de/matwis/amat/mw2_ge/kap_6/backbone/r6_3_2.html
- **ENET2:** <http://www.elektroniknet.de/halbleiter/leistungshalbleiter/artikel/104393/>
- **ENET3:** <http://www.elektroniknet.de/power/sonstiges/artikel/101701/>
- **INF15:** <http://www.infineon.com/cms/de/product/power/sicarbide-sic/1200v-thing!-tm-sic-diode/channel.html?channel=5546d461464245d301465caada1e7133>

MOSFET oder IGBT: Welches ist der bessere Halbleiterschalter?

MOSFET or IGBT: Which is the better semiconductor switch?

Sven Cholewa, TU Braunschweig, Braunschweig, s.cholewa@tu-bs.de

Kurzfassung

Der MOSFET und der IGBT sind zwei ähnlich aufgebaute Transistoren, die aus vier dotierten Zonen bestehen. Auf Grund des unterschiedlichen Aufbaus von Drain (MOSFET) und Kollektor (IGBT), erhalten beide Halbleiter verschiedene Eigenschaften. Diese machen sich vor allem im Schalt- und Durchlass-Verhalten bemerkbar. Beim MOSFET zeigen sich bei kleinen Betriebsspannungen und hohen Schaltfrequenzen Vorteile gegenüber dem IGBT. Bei ihm treten jedoch im Bereich höherer Sperrspannungen wesentlich geringere Durchlassverluste auf.

Abstract

The MOSFET and the IGBT are two similar constructed transistors, which consist of four doped zones. Because of the different structure of Drain (MOSFET) and Collector (IGBT), both semiconductor switches get different characteristics. These especially make noticeable in the flow- and switching behavior. The MOSFET show up at low operating voltages and high switching frequency benefits relative to the IGBT. However at it occurs at higher reverse voltages lower flow losses.

1 Einleitung

Der MOSFET (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) und der IGBT (insulated-gate bipolar transistor) sind zwei Transistoren, die beide sehr ähnlich aufgebaut und in der Leistungselektronik von hoher Bedeutung sind. Der MOSFET gehört zu der Gruppe der Feldeffekttransistoren, wobei der IGBT ein Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode ist. Für die Auswahl ist entscheidend, welcher Halbleiter für den jeweiligen Anwendungsfall die besseren Eigenschaften aufweist.

2 Theoretische Grundlagen

Sowohl der MOSFET als auch der IGBT bestehen im Wesentlichen aus vier unterschiedlich dotierten Zonen. Hierbei ist eine vertikale Anordnung in der Leistungselektronik üblich. Die Anschlüsse des MOSFETs werden mit Drain, Gate und Source bezeichnet. Beim IGBT lautet die Bezeichnung Kollektor, Gate und Emitter. Im Folgenden werden jeweils die n-Kanal Halbleiter betrachtet. Diese bilden durch anlegen einer positiven Spannung zwischen Gate und Source bzw. Emitter einen leitfähigen Kanal zwischen Drain und Source bzw. Kollektor und Emitter.

Die Steuerzonen der beiden Halbleiterschalter sind hierbei nahezu gleich konzipiert: In einer schwach dotierten n-Zone befinden sich zwei p-Wannen, die an einer Seite schwach dotiert und an der anderen stark dotiert sind. In diesen p-dotierten Wannen befinden sich jeweils zwei stark n-dotierte Schichten. Diese sind mit der Source- bzw. Emitter- Elektrode verbunden. Oberhalb der n-Zonen befindet sich bei beiden Transistoren die isolierte

Gate-Elektrode. Der Unterschied, der letztendlich für die verschiedenen Eigenschaften der beiden Halbleiterschalter sorgt, liegt im Aufbau der dritten Elektrode (Drain/Kollektor). Während die Drain-Elektrode des MOSFETs hier an eine stark n-dotierte Zone gekoppelt ist, wird die Emitter-Elektrode des IGBTs an eine stark p-dotierte Schicht angeschlossen (vergleiche Bild 1 u. Bild 2). [1]

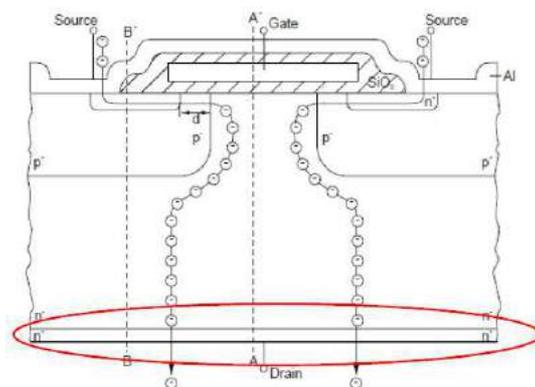


Bild 1 Leistungs-MOSFET im Durchlasszustand. [1]

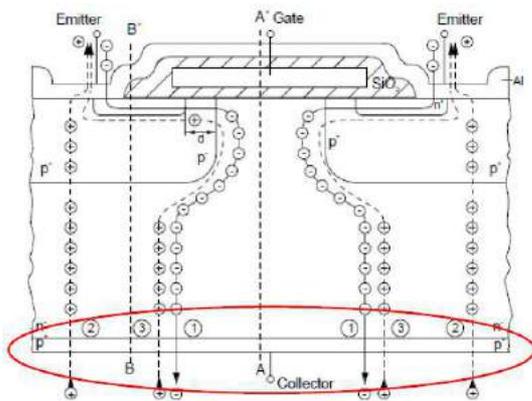


Bild 2 Leistungs-IGBT im Durchlasszustand. [1]

Wird nun eine ausreichend hohe positive Spannung zwischen Gate und Source- bzw. Emitter gelegt, bildet sich unterhalb des Gate-Anschlusses eine n-leitende Zone, die sich durch die p-Wannen erstreckt. Nun können Elektronen von der Source- bzw. Emitter-Elektrode in Richtung der Drain- bzw. Kollektor-Elektrode fließen. Während beim MOSFET die Raumladungszone abgebaut wird und hiernach ein Stromfluss mit Elektronen als Hauptladungsträger erfolgt, verhält sich der IGBT auf Grund der unteren p-Schicht anders. Hier erfolgt mit Eintreten von Elektronen in die p-Schicht, auf Grund der unterschiedlich starken Dotierung, eine Injektion von positiven Ladungsträgern in die obere schwach dotierte n-Zone. Diese wird nun mit Löchern "überschwemmt", wodurch die positiven Ladungsträger den größten Einfluss auf den Stromfluss nehmen. Durch diesen Effekt besitzt der IGBT einen niedrigeren Durchlass-Widerstand als der MOSFET. [1]

Auf Grund der Injektion von Löchern können bei einem IGBT geringere Durchlasswiderstände realisiert werden als bei vergleichbaren MOSFETs. Allerdings müssen die Löcher bei jedem Ein- und Ausschalten des IGBTs injiziert bzw. rückinjiziert werden, wofür eine zusätzliche Zeit erforderlich ist. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Schaltgeschwindigkeit. [1]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Im Folgenden werden die Ersatzschaltbilder, Kennlinienfelder und die Schaltvorgänge beider Transistoren näher erläutert. Außerdem werden die wichtigsten Weiterentwicklungen genannt.

3.1 MOSFET

3.1.1 Ersatzschaltbild

In Bild 3 ist das Ersatzschaltbild eines MOSFETs mit den wichtigsten parasitären Elementen dargestellt.

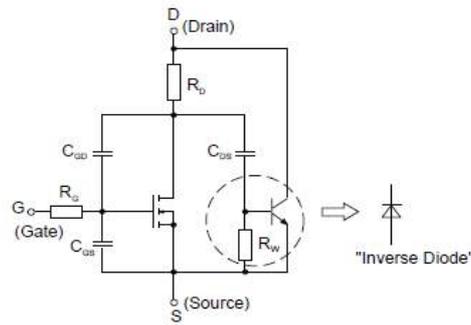


Bild 3 Parasitäres Ersatzschaltbild eines MOSFETs. [1]

Zu sehen sind zwei Kapazitäten, die sich durch die Überlappung der Gate- und Sourcemetallisierung (C_{GS}) sowie Gate und der n-Driftzone (C_{GD}) bilden. Des Weiteren entsteht eine Kapazität zwischen der p-Wanne und der n-Driftzone (C_{DS}). Außerdem enthält das Ersatzschaltbild die drei Widerstände R_G (interner Gatewiderstand), R_D (Drainwiderstand, Widerstand der n-Zone) und R_W (lateraler Widerstand der p-Wanne, Basis-Emitter-Widerstand des parasitären Bipolartransistors). Des Weiteren enthält das Ersatzschaltbild einen npn-Transistor. Der npn-Transistor wird durch eine p⁺-Dotierung kurzgeschlossen, da er den MOSFET negativ beeinflussen könnte. Hierdurch entsteht eine Inversdiode über die p-Wanne und n-Zone, die den MOSFET rückwärtsleitfähig macht. [1]

3.1.2 Ausgangskennlinienfeld

In Bild 4 ist das Ausgangskennlinienfeld eines MOSFETs dargestellt, das die verschiedenen Schaltzustände des MOSFETs zeigt. Im 1. Quadranten ist eine Sperrkennlinie sowie von U_G abhängige Durchlasskennlinien aufgetragen. Im 3. Quadranten ist die Inverskennlinie dargestellt. [1]

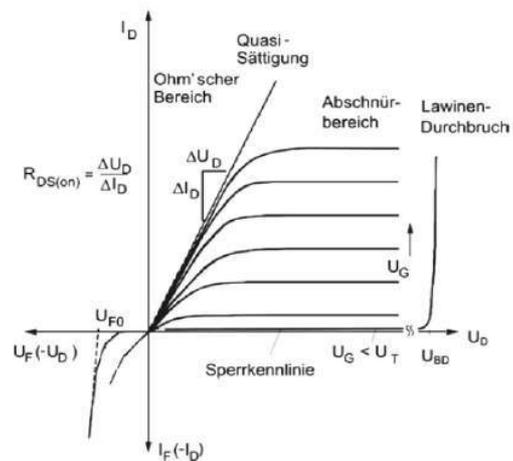


Bild 4 Ausgangskennlinienfeld eines MOSFETs. [1]

3.1.2.1 Sperrzustand

Solange U_G kleiner als die sogenannte Treshhold-Spannung (Spannung, ab der unter dem Gate ein leitender Kanal entsteht) ist, befindet sich der MOSFET auf der Sperrkennlinie. Es fließt lediglich ein sehr kleiner und vernachlässigbarer Reststrom. U_D ist durch den Lawinendurchbruch begrenzt, der etwa der Sperrspannung der Inversdiode entspricht. [1]

3.1.2.2 Durchlasszustand

Sobald U_G die Treshhold-Spannung überschreitet, beginnt der MOSFET zu leiten. Man unterscheidet hierbei zwischen dem ohmschen Bereich und dem Abschnürbereich. [1]

Im ohmschen Bereich besitzt der MOSFET noch einen kleinen Durchlasswiderstand $R_{DS,ON}$, der mit steigendem Stromfluss und höheren Temperaturen ansteigt. Eine Erhöhung von U_G kann den Durchlasswiderstand senken. Bei höheren Spannungen ist vor allem der Widerstand über die mittlere Driftzone für den höheren Durchlasswiderstand $R_{DS,ON}$ verantwortlich, da eine immer größere Raumladungszone im Driftgebiet entsteht. Der steigende Durchlasswiderstand kann aber auch von Vorteil sein, da der Transistor selbstständig hohe Ströme begrenzt und den Durchbruch verhindert. Diese Verhalten ist bei der Parallelschaltung mehrerer Halbleiter von Vorteil, da sich der Strom automatisch gleichmäßig auf alle Ventile aufteilt. [1][2]

Mit höheren Strömen fällt auch eine immer höhere werdende Spannung über den Kanal ab, die diesen verengt. Es kommt zur sogenannten Kanalabschnürung. Der Transistor befindet sich nun im Abschnürbereich, in dem der Strom nahezu konstant bleibt. [2]

3.1.2.3 Inversbetrieb

Auf Grund der vorhandenen Inversdiode ist der MOSFET, auch ohne einen leitenden Kanal unter dem Gate, rückwärtsleitfähig. Ein Betrieb mit leitendem Kanal kann zusätzlich die Durchlassspannung senken, da der Kanal den Strom parallel leitet. Die entsprechende Diodenkennlinie ist im 3. Quadranten der Ausgangskennlinie dargestellt. [1]

3.1.3 Entwicklung

3.1.3.1 Superjunction-MOSFET

Die erste wichtige Entwicklung im Bereich der MOSFETs war die Herstellung sogenannter Superjunction-MOSFETs. Bei diesen werden zusätzliche p-dotierte Säulen in die Driftzone implantiert, wodurch die hohe Abhängigkeit des Durchlasswiderstandes von der Durchbruchspannung drastisch gesenkt wird. Man

erreicht mit diesen MOSFETs noch niedrigere Durchlasswiderstände, weshalb dieser für noch höhere Sperrspannungen geeignet ist, die vorher dem IGBT vorenthalten waren. [2]

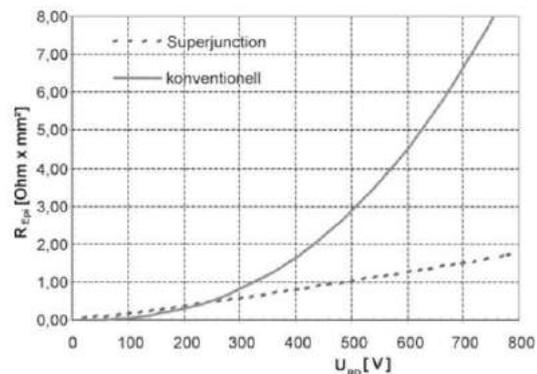


Bild 5 Vergleich des ansteigenden Durchlasswiderstandes in Abhängigkeit der Sperrspannung zwischen einem konventionellen- und Superjunction-MOSFET. [2]

Wie in Bild zu sehen ist, bringt der Superjunction-MOSFET jedoch keine Vorteile in Bereich niedrigerer Sperrspannungen.

3.1.3.2 Trench-Gate MOSFET

Eine weitere Weiterentwicklung des MOSFETs ist der Trench-Gate MOSFET. Hierbei wird die Gate-Elektrode senkrecht angeordnet, sodass sie sehr weit in die Driftzone eindringt. Durch diese Maßnahme wird die zu überwindene Strecke im Driftgebiet reduziert, wodurch vor allem der Kanalwiderstand gesenkt wird, der im Bereich niedrigerer Spannungen (<100V) hohen Einfluss auf den Durchlasswiderstand hat. Diese Methode verbessert den MOSFET vor allem bei niedrigen Sperrspannungen. [2]

3.1.3.3 Siliziumkarbid-MOSFET

Die zur Zeit attraktivste Entwicklung sind die SiC-MOSFETs, an denen schon seit Jahren geforscht wird, welche aber erst seit 2011 kommerziell erhältlich sind. Bei diesen MOSFETs wird Siliziumkarbid anstatt Silizium als Halbleitermaterial benutzt. Der wesentliche Vorteil von SiC-MOSFETs besteht darin, dass sie mit geringeren Dicken konzipiert werden können. Vergleichbare Sperrspannungen beanspruchen bei Si-MOSFETs wesentlich größere Bauteile. Die Durchlasswiderstände werden dadurch noch weiter gesenkt, weshalb SiC-MOSFETs für noch höhere Sperrspannungen konzipiert werden können. [2]

SiC-MOSFETs haben jedoch auch einen Nachteil, der sich in der Kanalleitfähigkeit bemerkbar macht. Verglichen mit Si-MOSFETs ist die Kanalleitfähigkeit bei

SiC-MOSFETs deutlich geringer, was den SiC-MOSFET gegenüber dem Si-MOSFET für niedrige Spannungen eher unattraktiv macht. Vor allem bei niedrigen Sperrspannungen hat der Kanalwiderstand einen maßgeblichen Anteil am Durchlasswiderstand $R_{DS,ON}$. [2]

3.1.4 Ausblick

Mittlerweile gibt es Superjunction-MOSFETs die für Sperrspannungen von 800 V ausgelegt sind. Es könnten noch höhere Sperrspannungen erreicht werden, jedoch wird der technologische Aufwand immer größer. Verbesserungen der Schalt- und Durchlasseigenschaften von bereits entwickelten Superjunction-MOSFETs sind wahrscheinlich. [1][2]

Die wohl aussichtsreichste Weiterentwicklung, sind SiC-MOSFETs. Hier werden erhebliche Verbesserungen prognostiziert, die einen MOSFET für Sperrspannungen von bis zu 10 kV ermöglichen sollen. Allerdings sind die Basismaterialkosten von SiC gegenüber Silizium erheblich höher. Es ist nicht zu erwarten, dass sich dieses in der Zukunft ändert. Eine vollständige Ablösung des Si-MOSFETs ist nicht zu erwarten. [3]

3.2 IGBT

3.2.1 Ersatzschaltbild

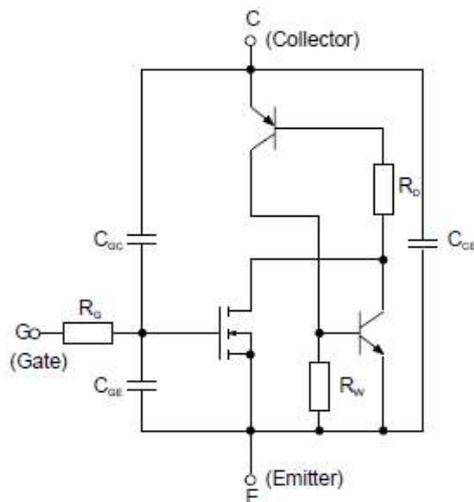


Bild 6 Parasitäres Ersatzschaltbild eines IGBTs. [1]

Wie der MOSFET, besitzt der IGBT drei Kapazitäten und drei Widerstände. Gateseitig liegt zudem ein idealer MOSFET an. Des Weiteren enthält das Ersatzschaltbild einen npn- sowie pnp-Transistor, die zusammen eine Thyristor-Struktur bilden. Das Einrasten (Latchup-Effekt) dieses Thyristors, würde den Verlust der Steuerfähigkeit des IGBTs und somit dessen Zerstörung bedeuten. Allerdings kann dieser Effekt in der Praxis durch

entsprechende Designmaßnahmen weitestgehend vermieden werden. [1]

3.2.2 Ausgangskennlinienfeld

Das Ausgangskennlinienfeld eines IGBT ist in Bild 7 dargestellt. Ein wesentlicher Unterschied zum MOSFET ist die Sättigungsspannung. Damit der IGBT leitet muss die untere n-p-Verarmungszone abgebaut werden, da der IGBT sonst trotz eines leitenden Kanals unter dem Gate, sperren würde. Dieser Vorgang erfordert eine bestimmte Mindestspannung von U_{DS} , weshalb der IGBT für kleine Betriebsspannungen weniger geeignet ist. [1]

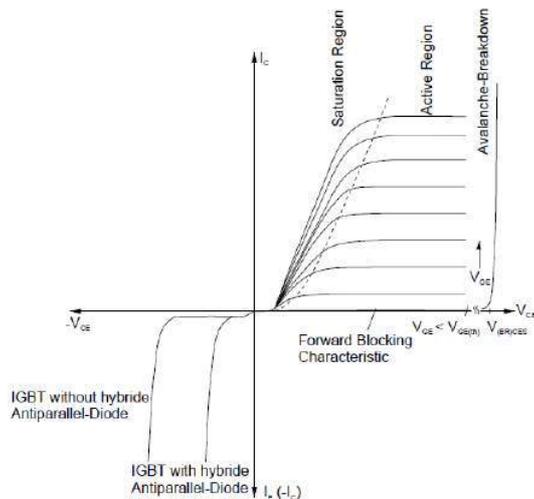


Bild 7 Ausgangskennlinienfeld eines IGBT. [1]

3.2.2.1 Sperrzustand

Im Sperrzustand ist die Sperrspannung durch den Lawinendurchbruch begrenzt. Diese entspricht in etwa der Durchbruchspannung des parasitären pnp-Transistors. Ein Überschreiten dieser Spannung kann wie beim MOSFET zur Zerstörung des Bauteils führen. [1]

3.2.2.2 Durchlasszustand

Damit der IGBT leitet, muss mindestens die Schwellspannung anliegen. Zusätzlich muss die Gate-Spannung über der Thresholdspannung liegen. Ein wesentlicher Vorteil zum MOSFET liegt darin, dass der Driftwiderstand bei höheren Strömen nicht ansteigt. Somit kann der IGBT auch für sehr hohe Sperrspannungen konzipiert werden. [1]

3.2.2.3 Inversbetrieb

Auf Grund des kollektorseitigen pn-Überganges, ist der IGBT nicht rückwärtsleitfähig. Diese Verarmungszone wird nämlich nur bei einer positiven Kollektor-Emitter-Spannung abgebaut. Auch bei vorhandenem Kanal fließt deshalb kein Strom. Die maximale zulässige Spannung im Inversbetrieb wird über die Durchbruchspannung dieses Überganges festgelegt. [1]

3.2.3 Entwicklung

3.2.3.1 PT-IGBT (Punch-Through-IGBT)

Ein wesentliches Problem der ersten IGBT-Grundstrukturen ist der Latchup-Effekt des parasitären Thyristors. Vor allem beim Ausschaltvorgang des IGBT kann der Thyristor einrasten und den IGBT zerstören. Mit dem PT-IGBT kann dieses effektiver verhindert werden. Dieser unterscheidet sich darin, dass eine zusätzliche n⁺-Schicht vor dem kollektorseitigen p⁺-Substrat implantiert wird. Außerdem wird mit dieser Maßnahme das Feld in der hinzugefügten n⁺-Schicht abgebaut. Der PT-IGBT erreicht durch diese Maßnahme geringere Schaltverluste. [2]

3.2.3.2 NPT-IGBT (Non-Punch-Through-IGBT)

Beim NPT-IGBT wird die Driftzone besonders dick gestaltet. Die kollektorseitige p⁺-Schicht hingegen sehr schmal. Im Gegensatz zum PT-IGBT wird beim NPT-IGBT das gesamte elektrische Feld über die Driftzone abgebaut. Durch diese Maßnahme hat der NPT-IGBT einen positiven Temperaturkoeffizienten, der bei Parallelschaltungen von IGBTs von Vorteil sein kann. Außerdem ist der NPT-IGBT besser vor dem Latchup-Effekt geschützt und erreicht kürzere Schaltzeiten. Ein weiterer Unterschied zum PT-IGBT ist der länger abklingende Tailstrom, allerdings fällt dieser beim PT-IGBT höher aus. [2]

3.2.3.3 Weitere Entwicklungen

Neben diesen zwei Grundkonzepten, gibt es bereits viele Weiterentwicklungen, welche vor allem darauf abzielen, die Schaltverluste zu reduzieren sowie höhere Sperrspannungen zu ermöglichen. Löcherbarrieren und Feldstoppschichten, die den Durchlasswiderstand senken, sind mittlerweile weit verbreitet. Auch Trench-Strukturen, die ebenfalls beim MOSFET genutzt werden, sind beim IGBT sehr beliebt. Des Weiteren wurden bereits beidseitig sperrfähige sowie rückwärtsleitende IGBTs entwickelt. [1] [2]

3.2.4 Ausblick

Mittlerweile gibt es kommerziell erhältliche IGBTs für Sperrspannungen von bis zu 6,5 kV. In der Entwicklung

sind IGBTs, die bis zu 10 kV Sperrspannung aufnehmen sollen. Die gegenwärtigen Konzepte werden immer weiter verbessert. Entwicklungen mit neuartigen Strukturen sind nicht zu erwarten. [2]

3.3 Vergleich des Schaltvorganges

Der Schaltvorgang des MOSFETs und IGBTs ähnelt sich weitestgehend. Anhand der parasitären Kapazitäten und Widerstände kann dieses beschrieben werden. Bild 8 zeigt den Verlauf der Gate-Source- und Kollektor-Emitter-Spannungen sowie des entstehenden Stromflusses in beiden Halbleiterschaltern beim harten Schalten (ohmsch-induktive Last mit nichtlückendem Laststrom). Im Lastkreis ist außerdem eine Freilaufdiode vorhanden, die das Abreißen des Laststroms verhindert. Anhand der einzelnen Zeitabschnitte soll der Schaltvorgang näher erläutert werden. [1]

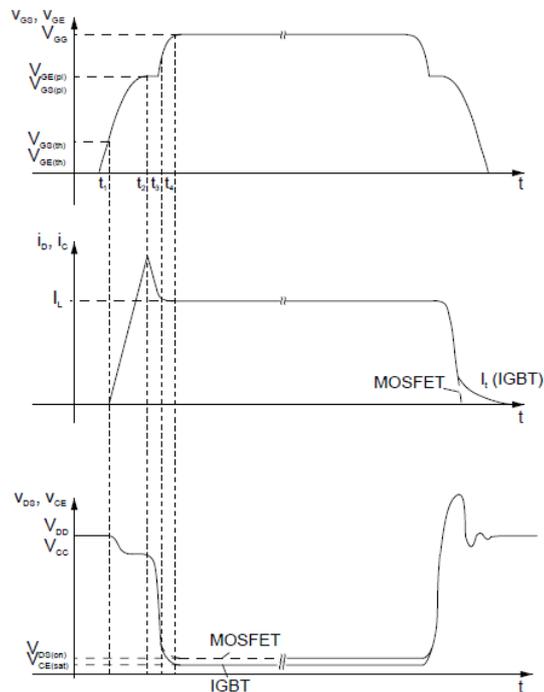


Bild 8 Schaltvorgang beim MOSFET und IGBT. [1]

3.3.1 Sperrender Zustand (t_0 bis t_1); IGBT und MOSFET

Anfangs werden die Steuerspannungen V_{GS} und V_{GE} zugeschaltet, hierdurch werden die Gatekapazitäten C_{GE} und C_{GS} geladen. Die Steuerspannungen steigen jeweils mit der durch die Kapazitäten und Gate-Widerständen bestimmten Zeitkonstante an. In diesem Bereich liegen die Steuerspannungen noch unter der Threshold-Spannungen, es fließen noch keine Ströme durch die beiden Transistoren. [1]

3.3.2 Stromanstieg (t_1 bis t_2); IGBT und MOSFET

Die Steuerspannungen haben die Threshold-Spannungen überschritten und beide Transistoren beginnen die Ströme I_C und I_D zu leiten. Die Gatekapazitäten werden weiter geladen, wodurch die Steuerspannungen weiter ansteigen. Parallel dazu steigen die Ströme weiter an. Die Kollektor-Emitter- und Drain-Source-Spannungen sinken noch nicht nennenswert ab, da die Transistoren noch nicht den vollen Laststrom führen. Die skizzierten geringen Spannungen lassen sich durch Spannungsfälle an den Induktivitäten erklären. In diesem Zeitabschnitt entstehen maßgebliche Schaltverluste. [1]

3.3.3 Sperrspannungsaufnahme der Freilaufdiode (t_2 bis t_3), IGBT und MOSFET

Ab dem Zeitpunkt t_2 kann die Freilaufdiode Sperrspannung aufnehmen, da nun die vollen Lastströme durch die Transistoren fließen. Auf Grund des Rückstromes kommt es vorübergehend zu einem erhöhten Stromfluss in beiden Transistoren, welcher bei t_3 wieder auf den Laststrom abgeklungen ist. In diesem Zeitabschnitt werden die Kapazitäten C_{GC} und C_{GD} umgeladen, wodurch die Spannungen V_{CE} und V_{DS} sinken und die Steuerspannungen nicht weiter ansteigen.

3.3.4 Schaltzeitintervall t_3 bis t_4

3.3.4.1 Sättigungsbereich des IGBTs

Zum Zeitpunkt t_3 hat die Kollektor-Emitter-Spannung des IGBTs bereits fast die Durchlassspannung $V_{CE(sat)}$ erreicht. Diese wird jedoch erst nach der Minoritätsträgerüberschwemmung in der Driftzone erreicht, was erst zum Zeitpunkt t_4 der Fall ist. Der weiterfließende Gatestrom lädt außerdem die Kapazität C_{GS} vollständig auf, wodurch die Steuerspannung zum Zeitpunkt t_4 ihren maximalen Wert erreicht. Zum Zeitpunkt t_4 ist der Einschaltvorgang abgeschlossen und der Arbeitspunkt des IGBTs befindet sich am Anfang des Sättigungsbereiches (siehe Bild 7). [1]

3.3.4.2 ohmscher Arbeitsbereich des MOSFET

Im Gegensatz zum IGBT ist der Einschaltvorgang des MOSFETs bereits zum Zeitpunkt t_3 abgeschlossen, da die Drain-Source-Spannung in diesem Zeitbereich nicht weiter absinkt. Lediglich das weitere Aufladen der Kapazität C_{GS} findet in diesem Zeitintervall statt. Der Arbeitspunkt des MOSFETs hat also zum Zeitpunkt t_3 den Beginn des ohmschen Arbeitsbereiches erreicht (siehe Bild 4). [1]

3.3.5 Ausschaltvorgang; IGBT und MOSFET

Die beschriebenen Vorgänge verlaufen nun in Rückwärtsrichtung. Es muss also wieder eine Umladung

der Kapazitäten erfolgen. Während der Stromfluss beim MOSFET nahezu konstant abfällt und wenig Zeit benötigt, sinkt der Stromfluss im IGBT zunächst stark ab und verflacht zunehmend. Es entsteht ein sogenannter Stromschweif (Tailstrom), der mit den vorhandenen Minoritätsladungsträgern in der Driftzone zu begründen ist. Diese müssen durch Rekombination und Rückinjektion wieder abgeführt werden. Dadurch entstehen beim IGBT höhere Schaltverluste während des Ausschaltvorganges. Die skizzierten Überschwingungen von V_{CE} und V_{DS} sind mit den parasitären Induktivitäten zu begründen. [1]

4 Kritische Würdigung

Trotz des sehr ähnlichen Aufbaus von IGBT und MOSFET ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften und damit Einsatzgebiete für beide Halbleiter. Durch verschiedene Weiterentwicklungen konnte das Einsatzgebiet beider Bauelemente maßgeblich erweitert werden.

Der MOSFET erreicht durch Fortschritte in der Mikroelektronik vor allem bei geringen Sperrspannungen ein immer besser werdendes Durchlassverhalten. Mit dem Superjunction-Prinzip konnte der Einsatzbereich auch für größere Sperrspannungen erweitert werden. Mit Hilfe der kommerziellen Verfügbarkeit von SiC-MOSFETs wird dieser Einsatzbereich wahrscheinlich zukünftig weiter ansteigen. Zusammenfassend ergibt sich mit den geringen Schaltverlusten und dem Ausbleiben einer Schwellspannung ein exzellenter Halbleiterschalter, der vor allem bei geringen Sperrspannungen und hohen Schaltfrequenzen seine Eigenschaften optimal ausnutzt. Allerdings wird der Einsatzbereich jenseits von 1000V wahrscheinlich weiterhin vom IGBT dominiert werden, da es keine MOSFET-Entwicklung gibt, die ohne wachsenden Durchlasswiderstand auskommt. Auch der Einsatz von SiC-MOSFETs wird in diesem Bereich beschränkt sein und den IGBT nicht verdrängen können. Verantwortlich hierfür sind die hohen Bauteilkosten. Der Einsatz von SiC-MOSFETs wird deshalb auf Bereiche beschränkt, wo Vorteile auf Systemebene die höheren Kosten rechtfertigen.

Somit wird die Weiterentwicklung von IGBTs auch in der Zukunft wichtig sein, da sie ohne wachsenden Durchlasswiderstand konzipiert werden können. Außerdem wurden bereits IGBTs mit positiven Temperaturkoeffizienten entwickelt. Der teilweise vorteilhaftere Effekt des wachsenden Durchlasswiderstandes, kann dadurch auch von IGBT ausgenutzt werden. Auch die Rückwärtsleitfähigkeit des MOSFETs konnte bereits übernommen werden, was den Einsatzbereich von IGBTs ebenfalls vergrößert hat. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der IGBT auch zukünftig weiter verbessert wird und der Einsatzbereich, durch niedrigere Schaltverluste und höheren Sperrspannungen, weiter ansteigt. Durch die strukturbedingten höheren

Schaltverluste und der benötigten Schwellspannung, ist der Bereich hoher Frequenzen und niedrigerer Spannungen allerdings weiterhin dem MOSFET vorenthalten.

5 Zusammenfassung

Mit den Vor- und Nachteilen lässt sich abschließend sagen, dass es auf den Einsatzbereich ankommt. Im Bereich niedrigerer Spannungen und hoher Schaltfrequenzen ist sicher der MOSFET der Bessere von Beiden, jedoch weist der IGBT bei hohen Sperrspannungen bessere Eigenschaften auf. Beide Halbleiterschalter sind also von hoher Bedeutung für die Leistungselektronik und werden wahrscheinlich auch in der Zukunft nicht wegzudenken sein.

6 Literatur

- [1] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky und T. Reimann, Applikationshandbuch Leistungshalbleiter, Ilmenau: ISLE, 2010.
- [2] J. Lutz, Halbleiter-Leistungsbaulemente, Berlin-Heidelberg: Springer-Vieweg, 2006.
- [3] P. Friedrichs, H. Mitlehner, D. Peters, D. Stephani: Perspektiven von SiC Leistungsschaltern: Entwicklungsstand und zukünftige Trends, Berlin: VDE-Tagung, 2004.



MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter?

Sven Cholewa, 20.01.2016

Agenda

- Einleitung
- MOSFET
- IGBT
- Vergleich des Schaltvorganges
- Zusammenfassung
- Quellen



Agenda

- Einleitung
- MOSFET
- IGBT
- Vergleich des Schaltvorganges
- Zusammenfassung
- Quellen

Einleitung

MOSFET und IGBT: Was ist das?

Der MOSFET und der IGBT sind zwei weitverbreitete und ähnlich aufgebaute Halbleiterschalter. Beide Transistoren gibt es als n-Kanal- und p-Kanal-Typen. Der MOSFET kann außerdem als selbstsperrender oder selbstleitender Halbleiterschalter hergestellt werden, der IGBT ist jedoch nur als selbstsperrender Transistor erhältlich. In diesem Vortrag behandeln wir die am weitest verbreiteten selbstsperrenden n-Kanal Transistoren.

MOSFET (metal-oxid-semiconductor field-effect transistor)

- Heute weitestgehend Polysilizium statt Metall (Aluminium) als Gate-Material
- Name MOSFET wurde beibehalten
- Seit 1960 in Herstellung

IGBT (insulated-gate bipolar transistor)

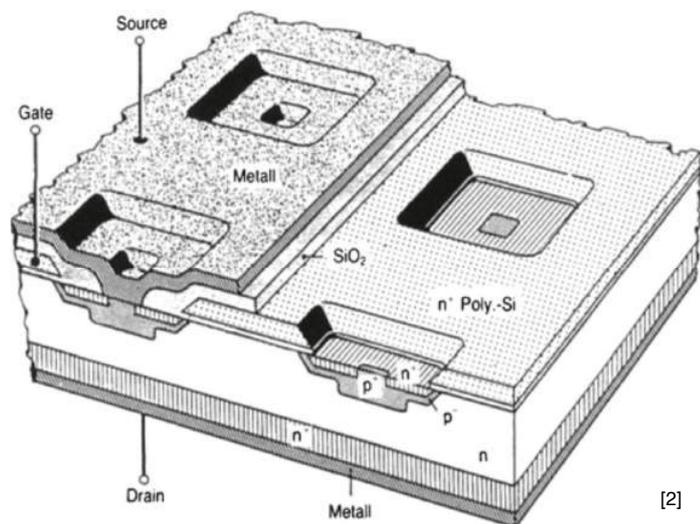
- Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode
- Aufbau ähnelt dem MOSFET weitestgehend
- Seit ca. 1980 in Herstellung

Agenda

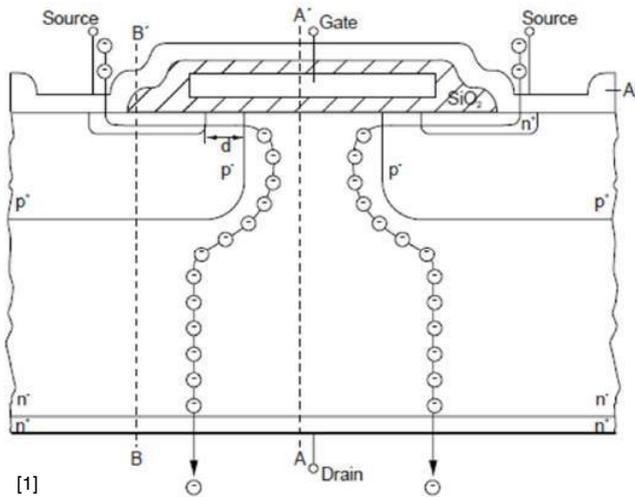
- Einleitung
- MOSFET
- IGBT
- Vergleich des Schaltvorganges
- Zusammenfassung
- Quellen

MOSFET

- Drei Anschlüsse
 - Gate, Source, Drain, (Bulk)
- Material
 - Halbleitermaterial: Silizium
 - Gate: Poly-Silizium
 - Isolierschicht: SiO_2
 - Source- u. Drain -Elektrode:
 - Aluminiummetallisierung
- Hier
 - Vertikalstruktur (DMOS)
 - n-Kanal MOSFET



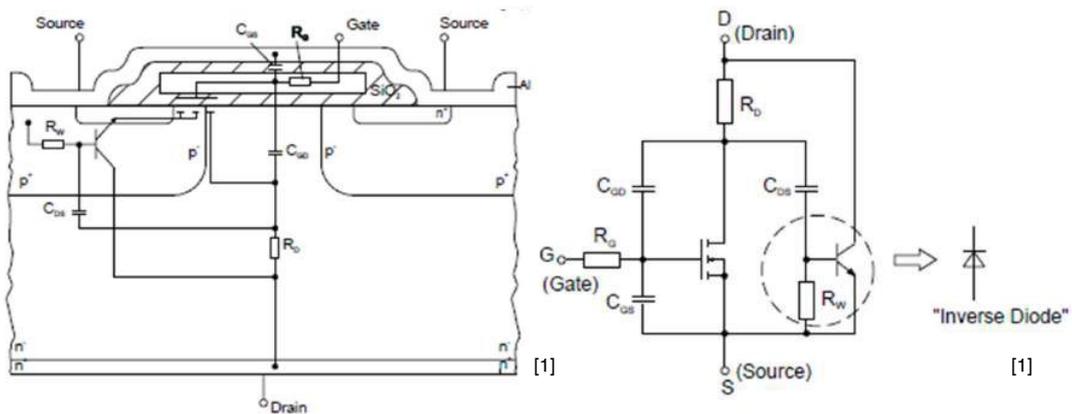
Funktionsprinzip



MOSFET im Durchlasszustand

- Positive Steuerspannung zwischen Gate und Source:
 $U_{GS} > U_{th}$ (Treshholdspannung)
- Es folgt:
 - Kanalbildung unter Gate
 - Majoritätsträgerfluss
 - Elektronen
 - Unipolarer Stromfluss

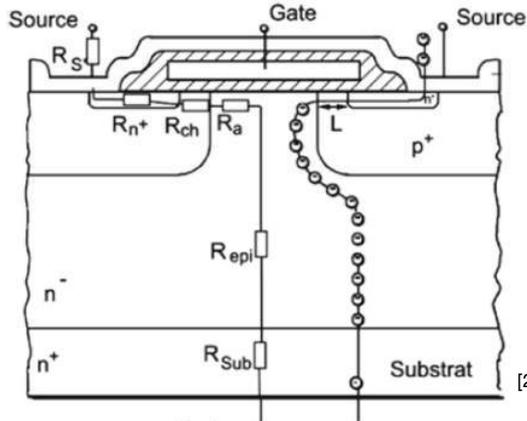
Parasitäres Ersatzschaltbild



Parasitäre Elemente

- **Kapazitäten:** Umladung bei jedem Schaltvorgang
- **Widerstände:** Durchlassverluste maßgebend durch Kanal- und Driftwiderstand
- **Inversdiode:** Entsteht durch kurzgeschlossenen npn-Transistor (p^+ -Dotierung am äußeren Rand der p-Wannen)

Durchlasswiderstand $R_{DS,ON}$



		$U_{DS}=30\text{ V} (\%)$	$U_{DS}=600\text{ V} (\%)$
R_S	package	7	0,5
R_{n^+}	source layer	6	0,5
R_{CH}	channel	28	1,5
R_a	accumulation layer	23	0,5
R_{epi}	N^- -layer	29	96,5
R_{Sub}	substrate	7	0,5

[2]

Der Durchlasswiderstand ist definiert durch $R_{DS,ON}$

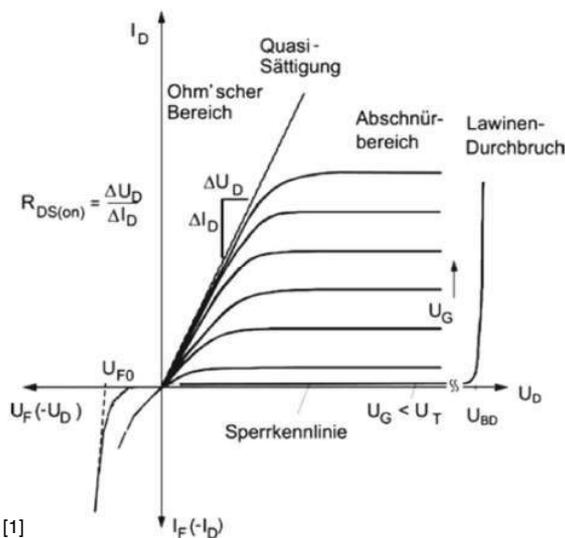
- Zusammensetzung verändert sich mit der Sperrspannung
- Kanalwiderstand dominiert bei niedrigen Sperrspannungen
- Driftwiderstand (R_{epi}) dominiert bei hohen Sperrspannungen
- $R_{DS,ON}$ steigt mit höheren Sperrspannungen (positiver Temperaturkoeffizient)



20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 9



Ausgangskennlinienfeld



[1]

Drei Zustände

- Sperrzustand
 - $U_{GS} < U_{th}$
 - Begrenzt durch Lawinendurchbruch
 - Entspricht etwa Sperrspannung der Inversdiode
- Durchlasszustand
 - $U_{GS} > U_{th}$
 - Ohmscher Bereich
 - Widerstandsgerade
 - Abschnürbereich:
 - Steigender Durchlasswiderstand
- Inversbetrieb
 - Diodenkennlinie



20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 10



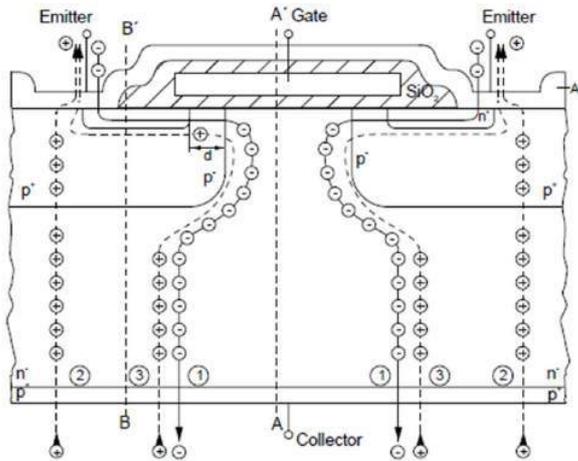
Die wichtigsten Weiterentwicklungen

	Veränderungen	Vorteile	Nachteile
Superjunction-MOSFET	<ul style="list-style-type: none"> Zusätzliche p-dotierte Säulen in der Driftzone 	<ul style="list-style-type: none"> Geringere Durchlasswiderstände 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Vorteile im Bereich niedriger Sperrspannungen
Trenchgate-MOSFET	<ul style="list-style-type: none"> Vertikale Anordnung der Gate-Schicht 	<ul style="list-style-type: none"> Geringerer Kanalwiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Vorteile im Bereich höherer Sperrspannungen
SiC-MOSFET	<ul style="list-style-type: none"> Siliziumkarbid statt Silizium als Halbleitermaterial 	<ul style="list-style-type: none"> Viel geringere Durchlasswiderstände 	<ul style="list-style-type: none"> Höhere Bauteilkosten Höherer Kanalwiderstand

Agenda

- Einleitung
- MOSFET
- IGBT
- Vergleich des Schaltvorganges
- Zusammenfassung
- Quellen

IGBT



[1]

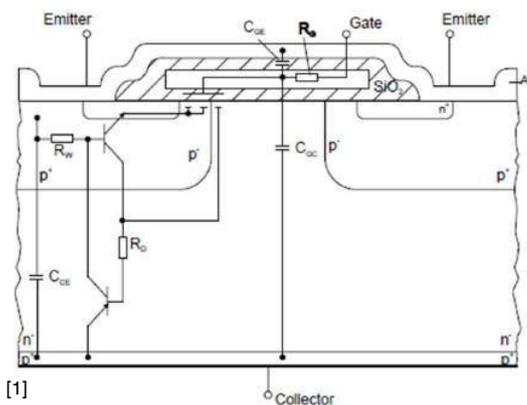
- **Anschlüsse:**
 - Gate, Collector, Emitter, (Bulk)
- **Material**
 - Substrat: Silizium
 - Gate: Poly-Silizium
 - Isolierschicht: SiO₂
 - Emitter- u. Collector -Elektrode:
 - Aluminiummetallisierung
- **Unterschied zum MOSFET:**
 - Kollektorseitige p⁺-Zone
 - Bipolarer Stromfluss
 - Durchlasswiderstand unabhängig von der Betriebsspannung



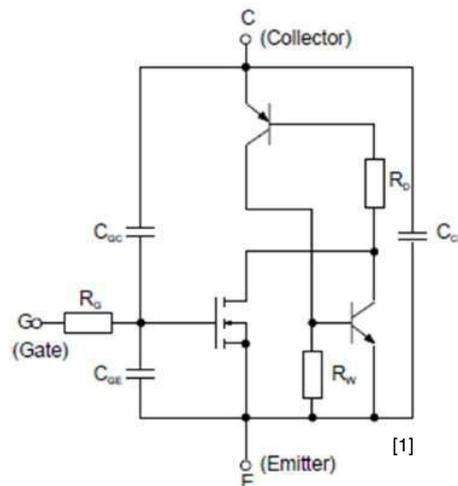
20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 13



Parasitäres Ersatzschaltbild



[1]



[1]

Parasitäre Elemente

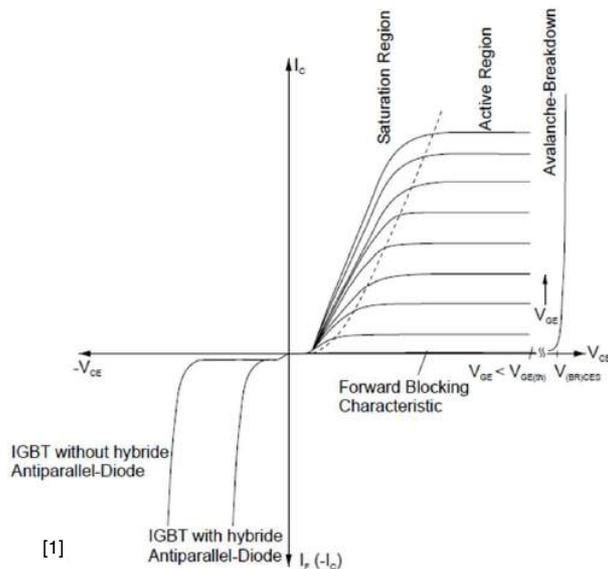
- Kapazitäten und Widerstände
- Thyristorstruktur: durch npn- und pnp- Transistor
 - Latchup-Effekt (Verlust der Steuerfähigkeit)
- Idealer MOSFET



20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 14



Ausgangskennlinienfeld



Drei Zustände

- Sperrzustand:
 - $U_{GE} < U_{th}$
 - Begrenzt durch Lawinendurchbruch (in etwa der Durchbruchspannung des pnp-Transistors)
- Durchlasszustand:
 - $U_{GE} > U_{th}$
 - $U_{CE} > \text{Schwellspannung}$
- Inversbetrieb:
 - Nicht rückwärtsleitfähig
 - Maximale Betriebsspannung entspricht etwa der Durchbruchspannung des kollektorseitigen pn-Überganges

Wichtige Weiterentwicklungen

	Veränderungen	Vorteile	Nachteile
PT-IGBT	<ul style="list-style-type: none"> • Zusätzliche n⁺-Schicht vor kollektorseitiger p⁺-Zone 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Schaltverluste • Verbessert gegen Latch-up-Effekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Tailstrom verglichen mit NPT-IGBT
NPT-IGBT	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr dicke Mittelschicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Positiver Temperaturkoeffizient • Kürzere Schaltzeiten • verbessert gegen Latch-up-Effekt 	<ul style="list-style-type: none"> • Länger-abklingender Tailstrom verglichen mit PT-IGBT
Trenchgate-IGBT	<ul style="list-style-type: none"> • Vertikale Anordnung der Gate-Schicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Ladungsträgerkonzentration im Mittelgebiet 	-

Weitere Entwicklungen

Des Weiteren:

- IGBTs mit Löcher-Barrieren
 - Zusätzliche n-Zone unter p-Wannen
 - Abfluss von Löchern wird erschwert
 - Geringerer Durchlasswiderstand
 - Geringere Sperrfähigkeit

- IGBTs mit Feldstoppschichten
 - Zusätzliche n⁺-Schicht vor kollektorseitiger p⁺-Zone
 - Geringerer Durchlasswiderstand

- Und
 - Beidseitig-sperrfähige IGBTs
 - Rückwärtsleitfähige IGBTs

Agenda

- Einleitung

- MOSFET

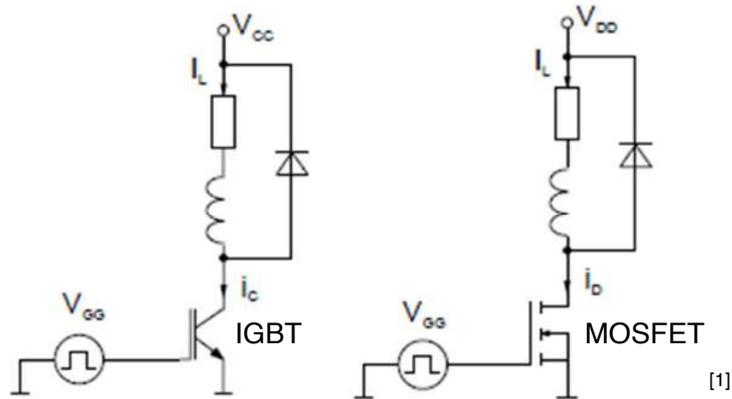
- IGBT

- Vergleich des Schaltvorganges

- Zusammenfassung

- Quellen

Vergleich des Schaltvorganges



Hartes Schalten

- Ohmsch-induktive Last
- Parallele Freilaufdiode
 - Verhindert das Abreißen des Laststroms
 - Nimmt Sperrspannung auf, sobald Transistoren den vollen Laststrom leiten

Vergleich des Schaltvorganges

Oberstes Diagramm

- Steuerspannungen U_{GS} und U_{GE}

Mittleres Diagramm

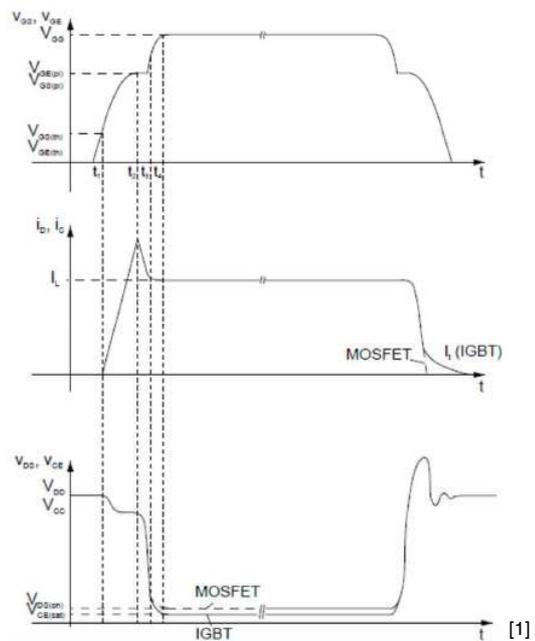
- Ströme durch die Transistoren

Unteres Diagramm

- Abfallende Spannungen über die Transistoren

Zeitliches Verhalten

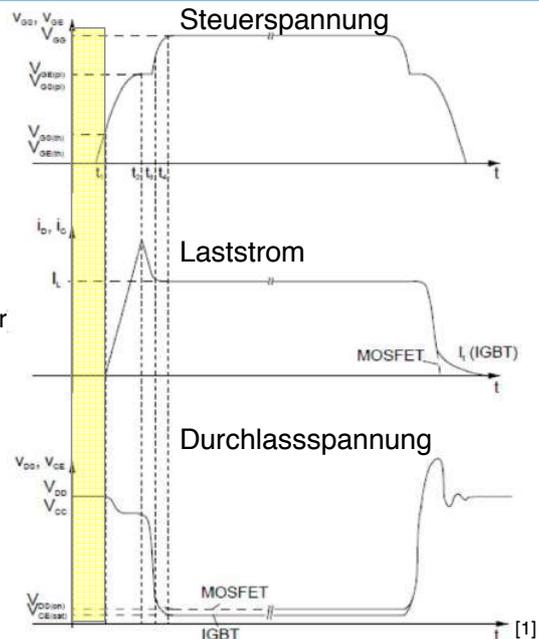
- 0 ... t_4 : Einschaltvorgang
- Am Ende der Kurven: Ausschaltvorgang



Vergleich des Schaltvorganges

$t_0 \dots t_1$ (Sperrender Zustand)

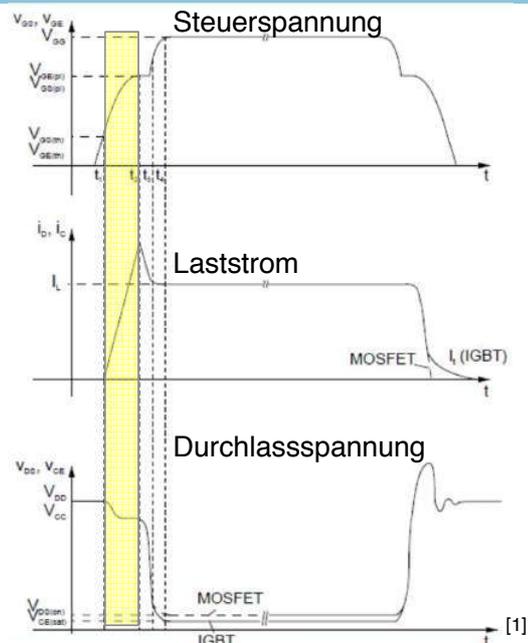
- Steuerspannungen werden zugeschaltet
- $U_{GS,GE} < U_{th}$
- Es fließt noch kein Strom
- Gate-Source- bzw. Gate-Emitter-Kapazität wird geladen (Erinnerung: Ersatzschaltbilder)
- Durchlassspannungen fallen noch nicht ab



Vergleich des Schaltvorganges

$t_1 \dots t_2$ (Stromanstieg)

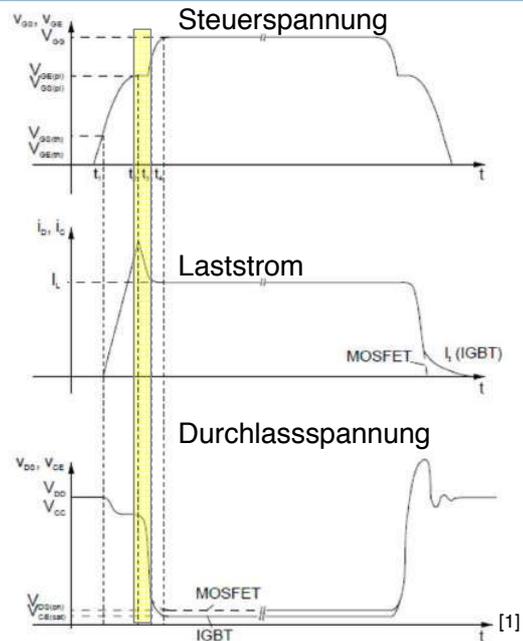
- $U_{GS,GE} > U_{th}$
- I_D u. I_C steigen an
- Steuerspannungen steigen weiter an
- Freilaufdioden können noch keine Sperrspannung aufnehmen
 - Sperrspannungen sinken kaum
 - Schaltverluste



Vergleich des Schaltvorganges

$t_2 \dots t_3$ (Transistoren leiten Laststrom)

- Transistoren leiten Laststrom
 - Freilaufdioden nehmen Sperrspannung auf
 - Kurzzeitig erhöhter Laststrom durch Rückstrom von Freilaufdioden
- Kapazitäten C_{GC} und C_{GD} werden umgeladen
 - Sperrspannung vom MOSFET sinkt auf Durchlassspannung ab
 - Sperrspannung vom IGBT sinkt fast auf Durchlassspannung ab
- Kapazitäten C_{GE} und C_{GS} werden nicht mehr geladen
 - Steuerspannungen steigen nicht weiter an



Vergleich des Schaltvorganges

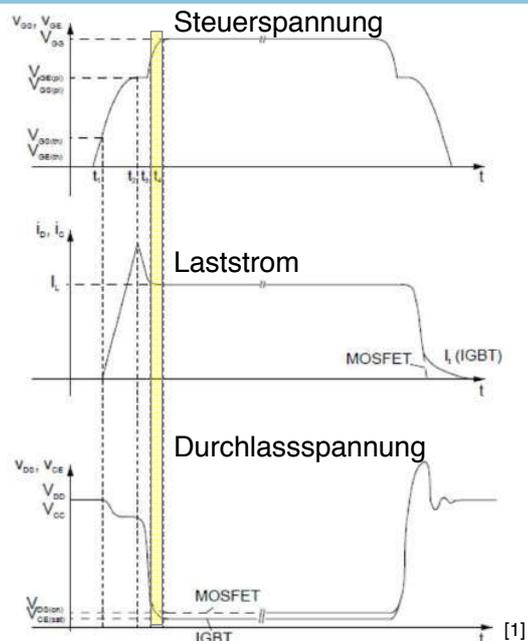
$t_3 \dots t_4$ (Erreichen der Arbeitspunkte)

MOSFET

- Drain-Source-Spannung sinkt nicht weiter ab
- Arbeitspunkt befindet sich bei t_3 am Beginn des ohmschen Bereichs
- C_{GS} wird wieder geladen
 - U_{GS} steigt bis t_4 weiter an

IGBT

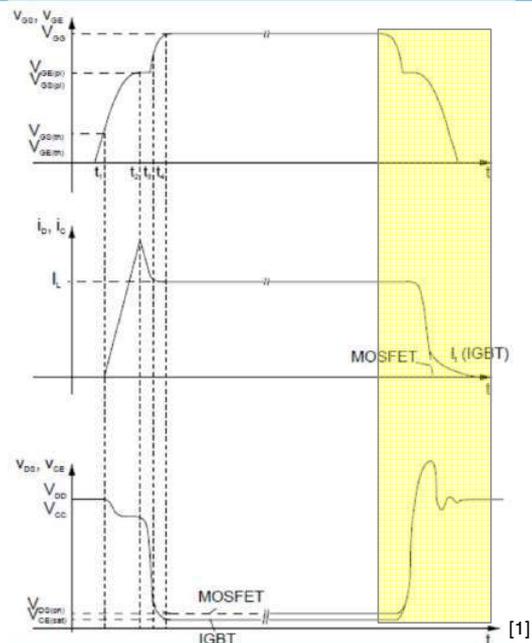
- Minoritätsladungsträger-Überschwemmung
 - Erst bei t_4 Durchlassspannung (Anfang Sättigungsbereich) erreicht
- C_{GE} wird wieder geladen
 - U_{GE} steigt bis t_4 weiter an



Vergleich des Schaltvorganges

Ausschaltvorgang

- Vorgänge verlaufen rückwärts
- Erneute Umladung der Kapazitäten
- Strom im MOSFET klingt schnell und konstant ab
- Beim IGBT müssen Minoritätsladungsträger durch Rekombination und Rückinjektion aus der Driftzone abtransportiert werden
 - Strom im IGBT klingt zunächst schnell ab, dann verflacht sich der Stromabstieg
 - „Tailstrom“
 - Höhere Schaltverluste



Agenda

- Einleitung
- MOSFET
- IGBT
- Vergleich des Schaltvorganges
- Zusammenfassung
- Quellen

Zusammenfassung

Parameter	MOSFET	IGBT
Durchlassverhalten	ON-Widerstand wirkt strombegrenzt / Steigt mit der Temperatur stark an	Abfall von der Sättigungsspannung weitestgehend unabhängig von der Temperatur
Durchlassverluste	Stark von Temperatur und Chipfläche abhängig	Hauptsächlich nur von der Sättigungsspannung
Spannungsfestigkeit	Hauptanwendung bis in den Bereich von einigen hundert Volt, möglich bis ca. 2 kV	Von einigen hundert Volt bis in den 6,5 kV Bereich
Schaltverluste	Gering, daher geeignet für hohe Frequenzen	Teilstrom, daher für hohe Frequenzen beschränkt
Schaltverhalten	Geeignet bis in den MHz-Bereich	Üblich bis 20 kHz, je nach Anwendung auch bis zu 300 kHz
Hauptanwendungen	Automobil, Kommunikation, Industrie	Hochleistungsbereich: Geregelte Antriebe, Unterbrechungsfreie Stromversorgungen

[4]



20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 27



Quellen

- [1] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky und T.Reimann, Applikationshandbuch Leistungshalbleiter, Ilmenau: ISLE, 2010.
- [2] J. Lutz, Halbleiter-Leistungsbaulemente, Berlin-Heidelberg: Springer-Vieweg, 2006.
- [3] P. Friedrichs, H. Mitlehner, D. Peters, D. Stephani: Perspektiven von SiC Leistungsschaltern: Entwicklungsstand und zukünftige Trends, Berlin: VDE-Tagung, 2004.
- [4] in Elektronik Industrie (Zeitschrift); 35, 5; 18-23: Verlagsgruppe Huthig, 2004.



20.01.2016 | Sven Cholewa | MOSFET oder IGBT: Welcher ist der bessere Halbleiterschalter? | Seite 28



Aufbau und praktische Umsetzung von Stoßstromgeneratoren (8/20, 10/350)

Structure and practical realisation of current impulse generators (8/20, 10/350)

Niklas Rühmann

Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - elenia, n.ruehmann@tu-bs.de

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es einen Stoßstromgenerator zu analysieren. Es wurde ein relativ simples Modell benutzt, um die Form des Impulses zu berechnen. Anhand von Literaturwerten wurden die Impulse von zwei verschiedenen Generatoren graphisch dargestellt und auf Einhaltung der Toleranzen überprüft. Die Ergebnisse verdeutlichten welchen Anforderungen an die Bauelemente gestellt werden und erlaubten das Aufstellen einiger Vorgaben für die Bauelemente.

Abstract

The objective of this paper was the analysis of a current impulse generator. A basic model was used to calculate the impulse's shape. Based on literature the impulses of two different generators were plotted and compliance with given tolerances was checked. The results showed high requirements for the elements and allowed the establishment of a few specifications for the elements.

1 Einleitung

Stoßstromgeneratoren werden verwendet, um elektrische Anlagen und Komponenten auf ihr Verhalten bezüglich Blitzeinschlags zu prüfen. Aufgrund hoher Spannungen und Ströme hat ein Blitzeinschlag großes Gefährdungspotenzial für sämtliche elektrische Anlagen. Das Ziel dieser Projektarbeit ist es den Aufbau und die Umsetzung von Stoßstromgeneratoren darzustellen. Hierbei soll auf einige spezielle Randbedingungen eingegangen werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Aufbau

Der grundlegende Aufbau ist in **Bild 1** dargestellt.

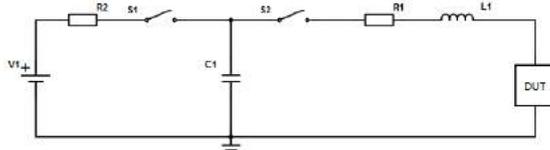


Bild 1 Ersatzschaltbild

Ein Stoßstromgenerator besteht aus einer Kondensatorbank C1 als Energiespeicher und einer Anschlussleitung zum zu testenden Gerät (DUT). Das DUT ist häufig ein surge protective device (SPD). Dieses besteht beispielsweise aus einem Metalloxidvaristor (MOV) [1].

Eine Gleichspannungsquelle V1 lädt die Kondensatorbank über einen Ladewiderstand R2. Dies erfolgt bis die gewünschte Spannung beziehungsweise Energie für den gewünschten Blitztyp erreicht ist. [1]

Über eine triggerbare Funkenstrecke S2 wird das zu testende Gerät angeschlossen.

Es gibt eine Anschlussleitung zum Gerät. Diese ist prinzipiell mit einem Widerstand R1 und einer Induktivität L1 behaftet, wobei sich insbesondere die Induktivität auf die Anstiegszeit des Impulses auswirkt.

Es lassen sich 2 getrennte Stromkreise identifizieren. Es gibt den Ladekreis bestehend aus V1, R2, S2 und C1 und den Entladekreis aus C1, S2, R1, L1 und dem DUT.

Der Entladekreis ist ein gedämpfter Reihenschwingkreis ohne Anregung. Je nach Dimensionierung der Elemente stellt sich der Kriechfall, aperiodische Grenzfall oder der Schwingfall ein.

2.2 Impulsform

Die Impulsform wird nach dem Schema T_1/T_2 benannt.

Bild 2 veranschaulicht die Definition der Anstiegszeit T_1 und der Abklingzeit T_2 .

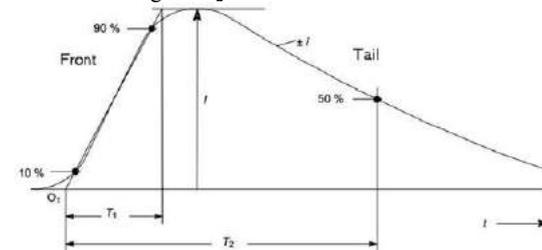


Bild 2 Definition Impulsform [1]

Für die Anstiegszeit wird durch die 10% ($T_{0,1}$) und 90% ($T_{0,9}$) Punkte vom Maximum der Kurve eine Gerade gelegt und die Zeit interpoliert. So ergibt sich:

$$T_1 = 1,25 \cdot (T_{0,9} - T_{0,1}) \quad (1)$$

Die Abklingzeit ist die Zeit zwischen interpoliertem Beginn und dem Zeitpunkt, an dem der Strom auf die Hälfte des Maximums gefallen ist. [3]

Damit die Impulsform stimmt müssen Kapazität, Induktivität und Widerstand aufeinander abgestimmt werden.

Da es in der Realität Abweichungen geben kann und ziemlich sicher wird, gibt es Toleranzen. T_1 und T_2 dürfen um $\pm 10\%$ von der Vorgabe abweichen. Die Amplitude eines möglichen Überschingers darf 20% der ersten Amplitude nicht überschreiten. [3]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

3.1 Theoretische Betrachtungen

Bild 3 zeigt das Ersatzschaltbild des Entladekreises im Laplace-Bereich. Mit diesem lässt sich der entstehende Strom $I(s)$ und daraus $i(t)$ berechnen. Hierbei wird angenommen, dass S1 offen und S2 geschlossen ist und nur C1 einen Anfangswert $U_{C,0}$ hat. Außerdem gelte $R1 = R$, $L1 = L$ und $C1 = C$.

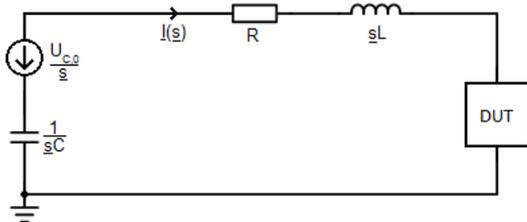


Bild 3 Entladekreis im Laplace-Bereich

3.1.1 Berechnung des Entladestroms

Grundlage ist das Ohmsche Gesetz für komplexe Größen:

$$I = \frac{U}{Z} \quad (2)$$

Wähle nun

$$U(s) = -\frac{U_{C,0}}{s} \quad (3)$$

und

$$Z(s) = sL + R + \frac{1}{sC} \quad (4)$$

(3) und (4) in (2) einsetzen ergibt:

$$I(s) = \frac{-\frac{U_{C,0}}{s}}{sL + R + \frac{1}{sC}} \quad (5)$$

Vereinfachen:

$$I(s) = \frac{-U_{C,0}}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} = \frac{-U_{C,0}}{L} \cdot \frac{1}{(s-s_1)(s-s_2)} \quad (6)$$

mit
$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (7)$$

Partialbruchzerlegung liefert:

$$I(s) = \frac{U_{C,0}}{L(s_2-s_1)} \cdot \left(\frac{1}{s-s_1} - \frac{1}{s-s_2} \right) \quad (8)$$

(8) kann nun zurück in den Zeitbereich transformiert werden.

$$i(t) = \frac{U_{C,0}}{L(s_2-s_1)} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \cdot \theta(t) \quad (9)$$

Mit (9) lässt sich nun der entstehende Strom zeitabhängig darstellen.

3.1.2 Gespeicherte Energie

Die in der Kondensatorbank gespeicherte Energie W bei Aufladespannung U lässt sich durch die für Kondensatoren geltende Energieformel berechnen.

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (10)$$

Diese Energie wird mit dem Stoßstrom in den Entladekreis gebracht.

3.1.3 Übersicht

Im Folgenden sollen die Stromverläufe für einen 8/20 und einen 10/350 Generator betrachtet werden. Hierfür werden die Werte aus **Tabelle 1** verwendet.

Generatortyp	8/20 [4]	10/350 [1]
R	11,86 Ω	1 Ω
L	108 μH	2 μH
C	600 nF	500 μF
$U_{C,0}$	30 kV	20 kV
s_1	$\sim (-54,9 + j111,4)$ kHz	~ -2 kHz
s_2	$\sim (-54,9 - j111,4)$ kHz	~ -498 kHz
W	270 J	100 kJ

Tabelle 1 Generatorparameter

3.1.4 Analyse 8/20 Generator

Unter Verwendung der Werte aus Tabelle 1 ergibt sich der in **Bild 4** gezeigte Verlauf.



Bild 4 Stromverlauf 8/20 Generator

Es ergibt sich eine stark gedämpfte Sinusschwingung mit einem klar erkennbaren Überschwinger.

Es lassen sich $T_{0,1} = 0,5 \mu\text{s}$ und $T_{0,9} = 6,5 \mu\text{s}$ ablesen. Mit (1) lässt sich T_1 so zu $7,5 \mu\text{s}$ bestimmen. T_2 kann als $20 \mu\text{s}$ abgelesen werden. Die erste Amplitude beträgt ca. 1,3 kA, die Amplitude des Überschingers ca. 275 A.

Die Toleranzen der Zeiten werden eingehalten. Die Amplitude des Überschingers ist geringfügig zu hoch.

3.1.5 Analyse 10/350 Generator

Unter Verwendung der Werte aus Tabelle 1 ergibt sich der in **Bild 5** gezeigte Verlauf.

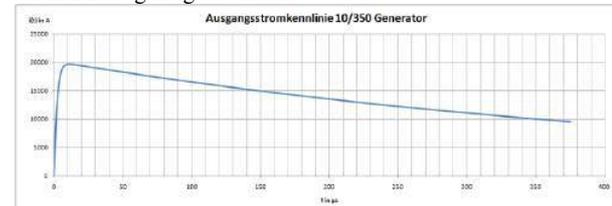


Bild 5 Stromverlauf 10/350 Generator

Es ergibt sich der Verlauf einer Schwingung im Kriechfall mit schnellem Anstieg und langsamem Abfall.

Es lassen sich $T_{0,1} = 0,2 \mu\text{s}$ und $T_{0,9} = 4,3 \mu\text{s}$ ablesen. Mit (1) lässt sich T_1 so zu $5,125 \mu\text{s}$ bestimmen. T_2 kann als $360 \mu\text{s}$ abgelesen werden. Die Amplitude liegt bei ca. $19,6 \text{ kA}$.

Die Toleranz bei T_2 wird eingehalten, bei T_1 wird die Toleranzgrenze deutlich unterschritten. Die Lage des wirklichen Maximums bei $11 \mu\text{s}$ ist aber innerhalb der Toleranzen. Problematisch für die Auswertung nach der vorgegebenen Methode ist, dass der Anstieg zu Beginn sehr steil ist.

3.2 Praktische Umsetzung

In Anbetracht der verwendeten Spannungen und umgesetzten Energie ist es klar, dass an die Bauelemente der betrachteten Stoßstromgeneratoren besondere Anforderungen gestellt werden. Diese Anforderungen haben auch zur Folge, dass Stromstoßgeneratoren eine gewisse Baugröße haben. Beispielsweise füllt der Generator aus [1] 2 Kästen von $1,7 \times 0,8 \times 1,8 \text{ m}$.

3.2.1 Ladekreis

Die Gleichspannungsquelle kann beispielsweise durch einen Transformator zum Anheben des Spannungslevels und einen Gleichrichter realisiert werden [1]. Im Gleichrichter muss darauf geachtet werden, dass die Dioden für die im Sperrbereich auftretenden Spannungen geeignet sind.

Es wird eine Kondensatorbank genutzt, da es oft keine Einzelkondensatoren den benötigten Spezifikationen gibt. Jeder Kondensator muss für die gewünschte Ladespannung ausgelegt sein.

R_2 ist so zu wählen, dass der maximal spezifizierte Ladestrom der Kondensatoren nicht überschritten wird und auch die in Gleichrichter und Transformator umgesetzte Leistung nicht zu groß wird. Deutlich zu groß sollte R_2 auch nicht gewählt werden, da sich sonst die Ladezeit zu stark verlängert, was die Nutzerfreundlichkeit verschlechtert.

Der Schalter S_1 muss den maximal auftretenden Ladestrom trennen können und ein Durchschlagen bei maximaler Aufladung darf auch nicht auftreten.

3.2.2 Entladekreis

Wichtig für die richtige Funktion des Generators ist ein sauberer, annähernd idealer Schaltvorgang, da sonst Übergangswiderstände und weitere parasitäre Störeffekte auftreten können. Diese nehmen Einfluss auf den Impuls und verfälschen ihn. Herkömmliche Schalter sind für die zu erwartenden Ströme und Anstiegszeiten nicht geeignet. Sie neigen bei schnellen Vorgängen zum Prellen [2]. Das bedeutet sie Öffnen und Schließen mehrfach innerhalb von wenigen Mikro- bis Millisekunden. Außerdem können sie durch die auftretenden Ströme verschweißen und somit zerstört werden.

Eine triggerbare Funkenstrecke hat diese Nachteile nicht. Ihr Funktionsprinzip ist eine gesteuerte Gasentladung, die sich für die notwendigen Anstiegszeiten eignet und die entstehenden Ströme aushält. Der Aufbau des

Lichtbogens dauert nur Nanosekunden, was mehrere Größenordnungen unter der Impulsdauer liegt [5]. Auch können die Elektroden nicht verschweißen, da sich zwischen ihnen immer ein Luftspalt befindet.

R_1 muss die in der Kondensatorbank enthaltene Energie umsetzen und dementsprechende Verlustleistungen aushalten.

Bei L_1 muss auf den Drahtquerschnitt geachtet werden, damit der Ohmsche Anteil nicht zu groß wird. Einerseits muss man diesen dann bei der Auswahl von R_1 berücksichtigen und R_1 eventuell kleiner wählen. Andererseits erzeugt der Ohmsche Anteil Verlustwärme, die im ungünstigsten Fall das Bauelement zerstören kann.

4 Kritische Würdigung

Es ist anzumerken, dass sämtliche Betrachtungen nur theoretisch erfolgt sind. In der Praxis muss getestet werden, ob der Aufbau auch das Gewünschte liefert und eventuell nachjustiert werden.

Weiterhin haben die genutzten Bauteile immer gewisse Toleranzen im Wertebereich, was zusätzliche Abweichungen liefert. Genauigkeit ist aber auch ein Kostenfaktor. Je geringer die Toleranzen sind, desto teurer sind die Bauteile.

Außerdem wurde der Einfluss des zu testenden Geräts (DUT) vernachlässigt. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die Impulsform ändert, wenn Induktivität, Kapazität oder Widerstand des SPDs in der Größenordnung der Generatorparameter sind.

Das Ersatzschaltbild lässt sich natürlich durch weitere Bauteile, die die Nichtidealitäten darstellen, ergänzen. Dies kann die Komplexität der Lösung jedoch in unbekanntem Maße steigern.

5 Zusammenfassung/Fazit

Stoßstromgeneratoren lassen durch einen gedämpften Reihenschwingkreis nachbilden. Die Berechnung des Impulses liefert ein verwertbares Ergebnis.

Je nach Amplituden- oder Energieforderung muss die Auslegung der Bauelemente erfolgen. Hochenergetische Impulse stellen eine große Belastung dar, die den Generator nicht zerstören dürfen.

In Zukunft wird versucht werden die Generator zu verkleinern und portabler zu machen. So kann das SPD vor Ort unter den dortigen Umgebungsbedingungen getestet werden.

6 Literatur

- [1] T. Gora, S. Muzoka, H. Hunt, K.J. Nixon: Design and construction of a 20 kA 10/350 μs current impulse generator, E+C SPOT ON 01/2014.
- [2] Tariq Naqvi/University of Waterloo, Switch Debouncing, <http://www.eng.uwaterloo.ca/~tnaqvi/downloads/DOC/sd192/SwitchDebouncing.htm> [11.12.2015].
- [3] A. Küchler, Hochspannungstechnik, Schweinfurt: Springer, 2005.

- [4] N. H. Halim, A. Azmi, Y. Yahya, F. Abdullah, M. Othman, M. S. Laili: Development of A Small Scale Standard Lightning Impulse Current Generator, The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia: 6-7 June 2011
- [5] P.F. Williams/F.E. Peterkin/University of Nebraska, Triggering in trigatron spark gaps: A fundamental study, 11.01.1989, <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=elecengwilliams> [01.01.2016]



Aufbau und praktische Umsetzung von Stoßstromgeneratoren (8/20, 10/350)

Niklas Rühmann, 20.01.2016

Agenda

- Einführung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Wolke-Erd-Blitz [6]



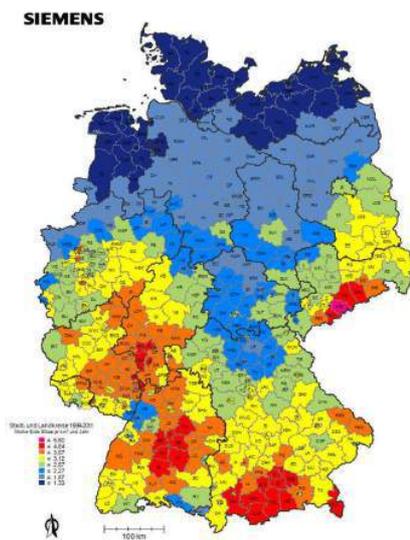
Agenda

- Einführung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Wolke-Erd-Blitz [6]

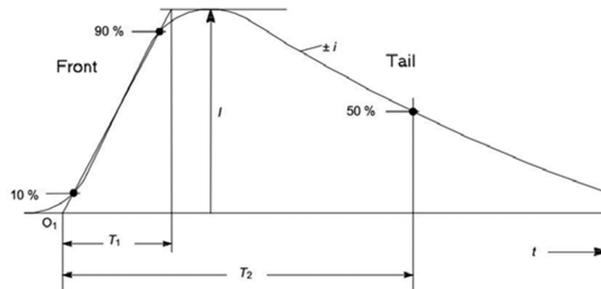
Einleitung



- Häufigkeit von Wolke-Erdblitzen pro km² und Jahr gemittelt 1999-2011
- Blau entspricht wenig, rot viel
- Gefährdung elektrischer Anlagen durch Auswirkungen von Blitzen
- Test von Schutzeinrichtungen gegen Blitzauswirkungen durch Stromstoßgeneratoren

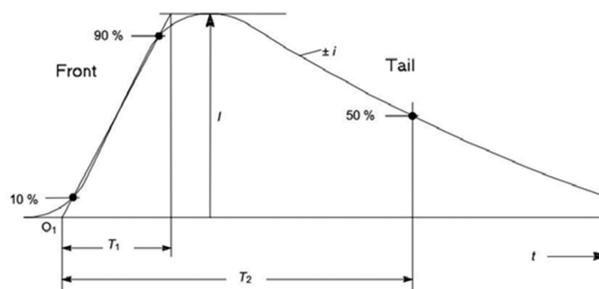
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Definition Impulsform [2]

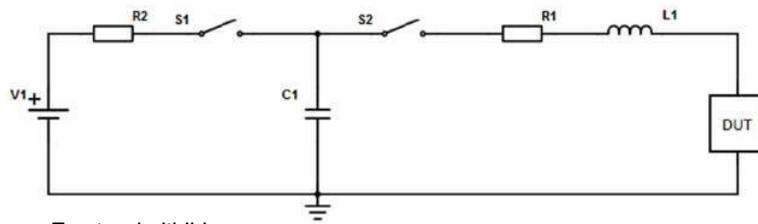
Impulsform



Definition Impulsform [2]

- Stromstoßgenerator Typ (T_1/T_2)
- $T_1 = 1,25(T_{0,9} - T_{0,1})$
- $\pm 10\%$ Amplitudenabweichung von der Vorgabe erlaubt
- $\pm 10\%$ Abweichung der Zeiten erlaubt
- Überschwinger maximal 20% der ersten Amplitude

Grundsaltung

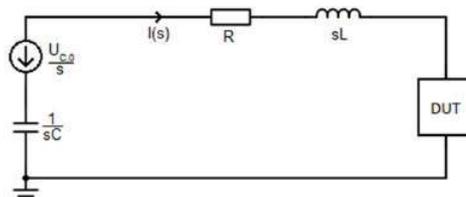


Ersatzschaltbild

- Ladekreis V_1 , R_2 , S_1 , C_1
- Entladekreis R_1 , L_1 , C_1 , S_2 , DUT
- Gedämpfter Reihenschwingkreis
- S_2 wird durch getriggerte Funkenstrecke realisiert
 - Kein Prellen oder Verschweißen
 - Sehr schnelles Schalten

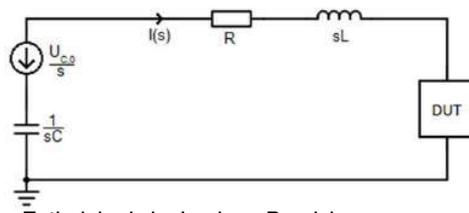
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Entladekreis im Laplace-Bereich

Berechnung



Entladekreis im Laplace-Bereich

$$\underline{I}(s) = \frac{U}{Z} = \frac{\text{einsetzen} + \text{PBZ}}{\dots} = \frac{U_{C,0}}{L \cdot (s_2 - s_1)} \cdot \left(\frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right)$$
$$s_{1,2} = \frac{-R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$
$$\xrightarrow{\text{Rücktransformation}} i(t) = \frac{U_{C,0}}{L \cdot (s_2 - s_1)} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \cdot \Theta(t)$$

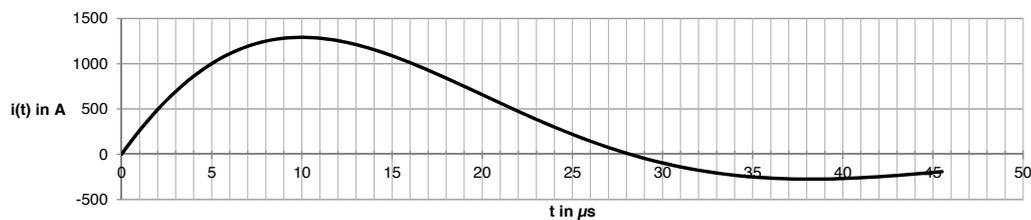
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung

Analyse 8/20 Generator

- Wahl von $R = 11,86 \Omega$, $L = 108 \mu\text{H}$, $C = 600 \text{ nF}$, $U_{C,0} = 30 \text{ kV}$ nach Literaturbeispiel
- Gedämpfte Schwingung mit klarem Überschwinger, „Schwingfall“
- $T_{0,1} = 0,5 \mu\text{s}$, $T_{0,9} = 6,5 \mu\text{s}$, $T_1 = 7,5 \mu\text{s}$, $T_2 = 20 \mu\text{s}$
- Toleranzen werden eingehalten
- 1. Amplitude ca. 1,3 kA, Überschwinger ca. 275 A
- Toleranz leicht überschritten

Ausgangstromkennlinie 8/20 Generator

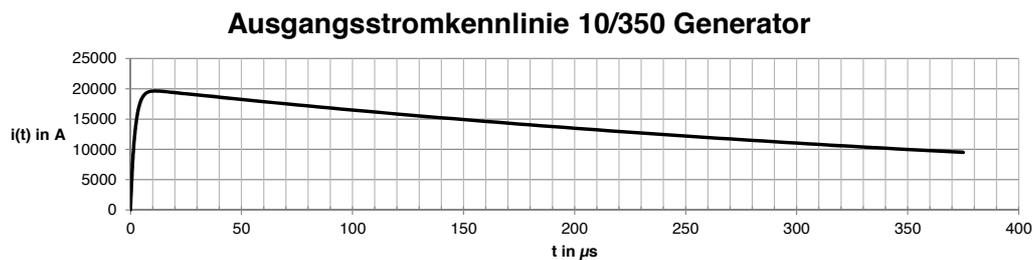


Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung

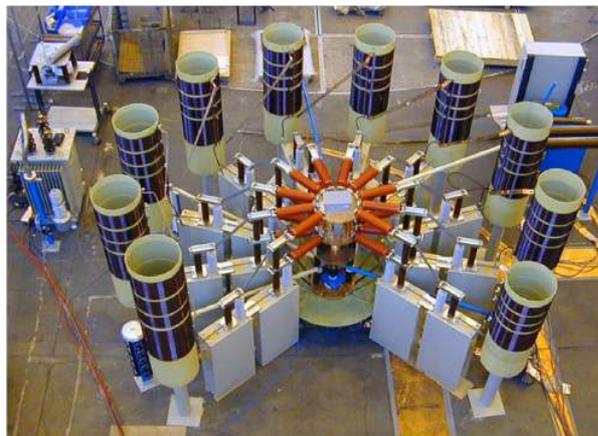
Analyse 10/350 Generator

- Wahl von $R = 1 \Omega$, $L = 2 \mu\text{H}$, $C = 500 \mu\text{F}$, $U_{C,0} = 20 \text{ kV}$ nach Literaturbeispiel
- Einmalige Schwingung mit langsam abnehmender Amplitude, „Kriechfall“
- $T_{0,1} = 0,2 \mu\text{s}$, $T_{0,9} = 4,3 \mu\text{s}$, $T_1 = 5,125 \mu\text{s}$, $T_2 = 360 \mu\text{s}$
- Toleranz für T_2 wird eingehalten, T_1 ist zu gering
- Echtes Maximum liegt bei $11 \mu\text{s}$ innerhalb Toleranz



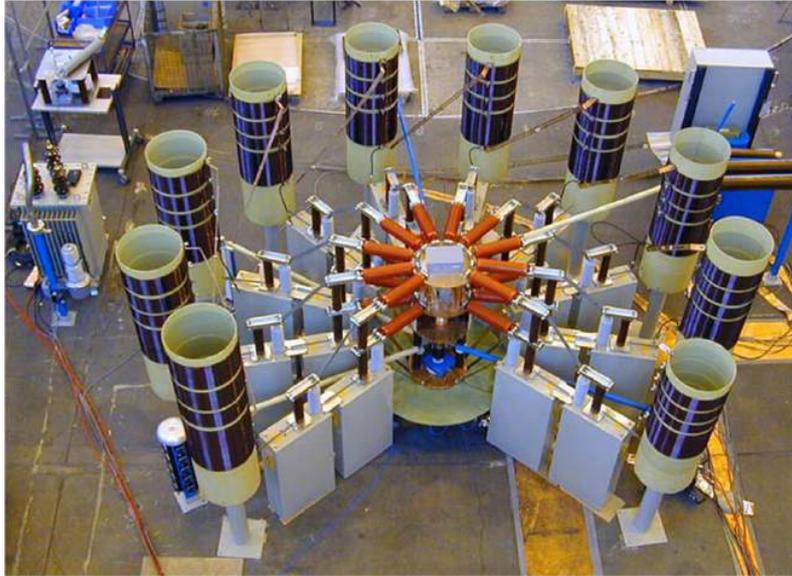
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Stoßstromgenerator [3]

Gesamtaufbau



Stoßstromgenerator [3]



20.01.2016 | Niklas Rühmann | Aufbau und praktische Umsetzung von Stromstoßgeneratoren (8/20, 10/350) | Seite 15



Widerstand



- Flüssigkeitsfüllung
- Elektroden oben und unten
- $\sim 10 \Omega$

Hochspannungswiderstand [4]



20.01.2016 | Niklas Rühmann | Aufbau und praktische Umsetzung von Stromstoßgeneratoren (8/20, 10/350) | Seite 16



Induktivität



Lange Luftpule [4]

- Stabilisierung durch Holzrahmen
- 40 Windungen
- 12,5 cm Radius
- 1 m Länge
- $\sim 100 \mu\text{H}$

Kapazität

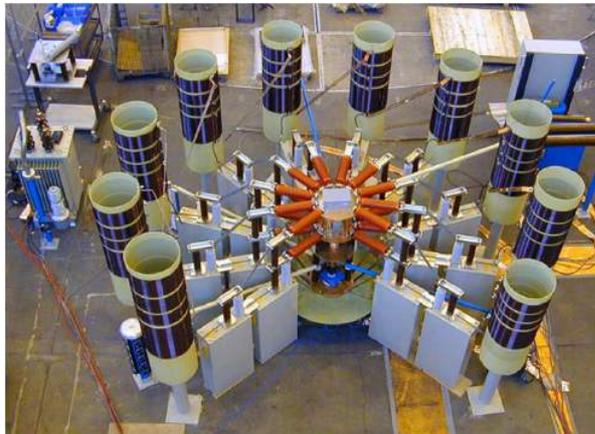


Hochspannungskondensator [5]

- Ölfüllung
- 15 kV Nennspannung
- 11,31 kvar Ladeleistung
- $16 \mu\text{F}$

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Berechnung
- Analyse 8/20 Generator
- Analyse 10/350 Generator
- Praktische Umsetzung
- Zusammenfassung



Stoßstromgenerator [3]

Zusammenfassung

- Darstellung durch gedämpften Reihenschwingkreis
 - Anforderungen an Bauelemente sind hoch
 - Gewisser Platzbedarf, abhängig von der Impulsenergie
 - In Zukunft: Verkleinerung der Generatoren
 - Steigerung der Portabilität
 - Test von Schutzeinrichtungen vor Ort
- => Eingehen auf lokale Besonderheiten

Quellen

- [1] http://www.ingenieur.de/var/storage/images/media/ingenieur.de/bilder/blitzatlas-deutschland/3113147-2-ger-DE/Blitzatlas-Deutschland_image_width_560.jpg 07.11.2015
- [2] T. Gora, S. Muzoka, H. Hunt, KJ Nixon: Design and construction of a 20 kA 10/350 μ s current impulse generator, E+C SPOT ON 01/2014
- [3] <http://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/3-40-5.pdf> 13.01.2016
- [4] N. H. Halim, A. Azmi, Y. Yahya, F. Abdullah, M. Othman, M. S. Laili: Development of A Small Scale Standard Lightning Impulse Current Generator, The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia: 6-7 June 2011
- [5] elenia
- [6] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lightning3.jpg> 13.01.2016



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen

Implementation of lightning protection concepts in homes

Felix Fitzl, Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen, Braunschweig, F.Fitzl@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Überspannungsableiter müssen zuverlässig hohen thermischen und elektrischen Belastungen standhalten. Daher ist es wichtig sich mit der Weiterentwicklung und Absicherung solcher Bauteile, im Hinblick auf Wartungsfreiheit und Langlebigkeit zu beschäftigen. In nahezu allen sicherheitskritischen Anlagen und Anlagen mit hohen Investitionskosten sind bereits Überspannungsableiter verbaut. Dabei ist ein aktueller Entwicklungstrend das Beherrschen von netzinternen Überspannungen.

Abstract

Surge Protectors have to reliable handle high thermal and electrical loads. Therefore it is necessary to investigate the further development and to increase the safety of such components, in terms of better maintenance and durability. Almost all safety critic and expensive Systems are already protected with Surge protective devices. The topic of network intern overvoltage gets more and more important.

1 Einleitung

Bei elektrischen Anlagen mit hohen Investitionskosten besteht der Bedarf nach Überspannungsableitern. Gerade da es z.B. seit der Entwicklung des Internets einen Zuwachs an permanent durchstromten Verbrauchern und Anlagen gibt. Es sind nicht nur elektrische Geräte abzusichern, die während ihrer vergleichsweise kurzen Nutzung von Menschen bedient werden (z.B. Küche, TV...), sondern auch beispielsweise Server, Router, Alarmsysteme oder Industrieanlagen.

Diese über Jahre hinweg laufenden Geräte werden vergleichsweise selten gewartet und müssen so ausgelegt und geschützt werden, dass sie auch ohne den Eingriff durch den Menschen nach einer Störung fehlerfrei weiter arbeiten. Dies ist nicht nur bei sicherheitskritischen Systemen wichtig. Auch die Kosten für ein erneutes Hochfahren und die Reparatur von Industrieanlagen sind zu beachten. Um die Anlagen sicher und unterbrechungsfrei betreiben zu können wird intensiv an neuen Konzepten für Überspannungsableitern geforscht.

2 Theoretische Grundlagen

Betrachtet wird, in diesem Projekt, der inneren Überspannungsschutz in Eigenheimen. Insgesamt teilt sich ein technisch sicheres Schutzsystem für Privathaushalte in drei Teile auf. Die 3 Stufen der Ableiter sind: Typ 1, Typ 2, und Typ 3, [1]. Im Versorgungsnetz des Energieversorgers ist schon ein Grobschutz integriert.

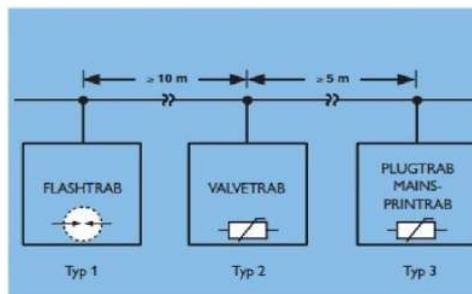


Abbildung 1: Anordnungsbeispiel Blitzstromableiter (Typ 1-3)

Typ 1 senkt die Spannung auf für Typ 2 verträgliche Pegel ab und ist daher auch in der Installation am Hausanschluss des Versorgungsnetzes angebracht. Die drei Gebäudeeigenen Schutzstufen sind aufeinander aufgebaut und voneinander abhängig. Sie sind durch meterlange Leitungen mit definierten Induktivitäten von einander zu entkoppeln (siehe Abbildung 1). Typ 1 Ableiter sind der Grobschutz. Sie sind die wichtigsten Komponenten und senken die Spannung auf max. 1300 - 6000 V (Modell und Baujahrabhängig) ab. Er wird durch Funkenstrecken realisiert.

Die nächste Schutzebene ist der Mittelschutz (Typ 2). Er wird z.B. in Etagenverteilern angebracht und meist durch Varistoren realisiert. Hier wird die Spannung auf 600 - 2000 V reduziert.

Als letztes bildet der Feinschutz (Typ 3) auf Steckdosenebene weiteren Schutz, [4]. Hier wird die Spannung auf für Endgeräte verträgliche Pegel abgesenkt. Dies wird mit Suppressordioden realisiert. In allen Geräten mit "CE-Zeichen" sollte diese Schutzebene (Typ 3) integriert sein. Dies ist in einigen Ländern gesetzlich vorgeschrieben.

Überspannungsableiter, welche in Sicherungskästen verbaut sind, kosten im Schnitt 140 € für Typ 1, 220 € für Typ 2 und 80 € für Typ 3 (Herstellerabhängig, Quelle: Phoenix Contact).

3 Hauptteil / Erkenntnisse

3.1 Grobschutz (Typ 1)

Die Schutzelemente der drei Schutzstufen bestehen aus vier Grundlegenden Bauteilen. Ableiter vom Schutztyp 1 sind die ersten Komponenten und müssen die höchsten Energien ableiten können. Sie bestehen meist aus Funkenstrecken, je nach Bedarf werden auch Gasableiter eingesetzt. Funkenstrecken können in der Regel höhere Ströme beschädigungsfrei ableiten als Gasableiter. Funkenstrecken sind jedoch nicht hermetisch verschlossen. Sie können nicht exakt auf eine bestimmte Zündspannung eingestellt werden.

Dies wird bei Gasableitern unter anderem über das verwendete Gas eingestellt. Gasableiter sind nicht selbstlöschend. Beide bestehen aus zwei in einem vorgegebenen Abstand angeordneten Elektroden über welche durch einen Lichtbogen ein Strom abgeleitet wird. Sie werden parallel zu der zu schützenden Anlage integriert. Wenn nun eine Fehlerspannung die durch den Abstand der Elektroden vorgegebenen elektrische Festigkeit überschreitet führt dies zu einem Überschlag zwischen den beiden Elektroden.

Bei älteren Ausführungen von Funkenstecke kann es teilweise zu hohen Netzfolgeströmen nach einer Zündung kommen. Hierdurch wird die zu schützende Anlage zeitweise vom Netz getrennt. Bei modernen Systemen werden teilweise alternative Zündkonzepte verwendet, [3].

3.2 Mittelschutz (Typ 2)

Die Schutzelemente von Typ 2 Ableitern werden durch Varistoren realisiert. Ein Varistor ist ein spannungsabhängiger Widerstand. Varistoren bestehen heute vorwiegend aus Zinkoxid. Zinkoxid ist ein mikroskopisch, körniges Material. Jedes dieser Körner hat je nach seiner Größe unterschiedlicher Leitfähigkeiten und wird in runde Plättchen gepresst und mit 2 Kontakten versehen. An den Berührungspunkten der Zinkoxidkörner entstehen kleine Sperrschichten.

Durch zunehmende anliegende Spannung entsteht ein elektrisches Feld zwischen den Elektroden welches die Sperrschichten mit zunehmender Höhe der Spannung abbaut, [5]. Dadurch ist über die Dicke bzw. Größe der Tabletten einstellbar, ab wann der Varistor leitend wird. Somit wird festgelegt wie viel Spannung maximal in die zu schützende Anlage eingespeist wird. Der Varistor wird, wie auch Ableiter von Typ 1 parallel zum zu schützenden Objekt angeschlossen und senkt die Spannung auf einen Pegel der für Schutztyp 3 verstädlich ist, [3].

3.3 Feinschutz (Typ 3)

Die Funktion von Überspannungsableitern Typ 3 wird durch Suppressordioden übernommen. Suppressordioden basieren auf dem Prinzip von Zehnerdioden. Im Unterschied zu diesen haben Suppressordioden allerdings eine steilere Strom-Spannungs Kennlinie und somit ein besseres Ableitvermögen weil sie schneller ansprechen. (siehe Abbildung 2)

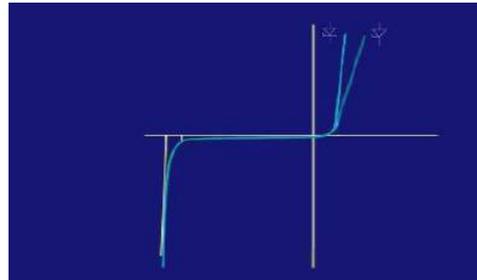


Abbildung 2: Kennlinien Suppressordiode und Zehnerdiode

Für den Wechselspannungsbereich gibt es bipolare Suppressordioden welche eine aus den 1. Quadranten am Ursprung gespiegelte Kennlinie auch im negativen 3. Quadranten aufweisen. Sie haben in der Regel einen sehr kleinen Durchbruchspannungsbereich und schalten im ns Bereich, [2]. Sie werden ebenfalls parallel zu der zu schützenden Schaltung verbaut und senken die Spannung auf ein für Endgeräte ungefährlichen Pegel herab.

3.4 Installationsbeispiel

Es gibt drei mögliche Ausführungen des Niederspannungsnetzes mit denen die drei Überspannungsableiter im Haus verschaltet werden können. Diese wurden jeweils für Anwendungsbereiche mit unterschiedlichen Anforderungen an die Überspannungsschutzgeräte entworfen.

Die häufigste Ausführung ist das sogenannte TN-System. Dieses wird für Privathäuser und Anlagen ohne besondere Schutzanforderungen genutzt. Es ist moderner als das TT-System, welches noch in einigen Ländern als Standard für Privathäuser anstelle des TN-System eingesetzt wird. Das TT-System hat einen Leiter weniger als das TN-System, welches einen PE (protective earth) Leiter als zusätzlichen Schutz integriert hat über welchen in Fehlerfall er Strom abgeleitet wird. Die dritte Verschaltungsart ist das IT-System. Dieses ist umfangreicher als die beiden anderen Ausgelegt und hat eine ständige Isolationsüberwachung. Dies bedeutet, dass ständig elektrisch überprüft wird, ob Strom über den Nullleiter gegen Masse abfließt und somit ein Fehlerfall im System eingetreten ist oder nicht. So kann in kürzester Zeit ein Fehler erkannt und auf diese reagiert werden, [1]. So kann z.B. bei einem Kurzschluss in einer der drei Phasen das daran angeschlossene Gerät ohne Notabschaltung weiter betrieben werden. Diese Ausführung der Überspannungsableiter wird

ausschließlich für z.B. in Kliniken für sehr teure und empfindliche Geräte bzw. kostspielige Industrieanlagen eingesetzt. Die drei Überspannungsableitertypen werden dann in dem zu schützenden Objekt nach dem jeweils passenden System verschaltet.

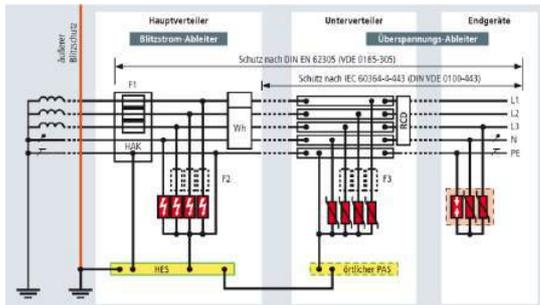


Abbildung 3: Verschaltung der drei Überspannungsschutzableiter im TN-System

In Abbildung 3 ist das TN-System dargestellt. Es besteht aus den drei Phasen (L1, L2 und L3) des öffentlichen Stromnetzes und hat zusätzlich noch einen Nullleiter (N) und einen Schutzleiter (PE). Dieser ist mit den Potentialausgleichsschienen (PAS) und der Haupterdungsschiene (HES) verbunden. Durch die gepunkteten Abschnitte in den Leitungen wird die große Länge der Leitungen zwischen den Ableitertypen angedeutet. In diesem System werden direkt nach dem Hauptanschlusskasten (HAK) alle drei Netzleitungen über Typ 1 Ableiter gegen die Potentialausgleichsschiene abgeleitet. Danach folgt der Drehstromzähler (Wh). Für jede Etage wird ein Unterverteiler benötigt, in welchem alle drei Phasen über Typ 2 Ableiter gegen Masse abgesichert werden. Danach folgt das optionale RCD (Residual Current Device, Reststromschutzgerät). Dieses wird auch oft als FI-Schalter bezeichnet. Es vergleicht nach der ersten Kirchhoffschen Regel (Knotenregel) die Summe aller an seinem Eingang einfließenden Ströme mit der Summe aller an seinem Ausgang abfließenden Ströme. Sollten diese Summen nicht identisch sein liegt ein Fehlerfall vor und der fehlende Teil des Stromes fließt über den PE-Leiter gegen Masse ab. Als letztes wird in diesem System auf Steckdosenebene jede Phase gegen den Nullleiter mit Ableitern von Typ 3 abgeleitet.

Überspannungsschutzsysteme sind in Privathäusern momentan noch kaum verbreitet. Für ein derartiges System werden nur für die Bauteile, je nach Ausführung und Marke, für die Absicherung des Hauptanschlusskastens ca. 140€ pro Phase fällig. Weiterhin muss pro Etage ein Ableiter vom Typ 2 für ca. 220€ pro Phase verbaut und als letztes noch pro abgesicherte Steckdose 80€ veranschlagt werden. Somit belaufen sich die Kosten für ein Privathaus schnell auf über 2000€. Oft werden auch Heizungssteuerungen und Andere kostspielige Geräte noch zusätzlich über Typ 3 Ableiter angeschlossen. Bei Industrieanlagen werden oft weitaus mehr und kompliziertere Überspannungsschutzgeräte eingesetzt. In Abbildung 4 ist der Unterschied der Absicherung einer handelsüblichen Steckdose und einer Anlagensteuerung mit Typ 3 Ableitern zu sehen, [1].

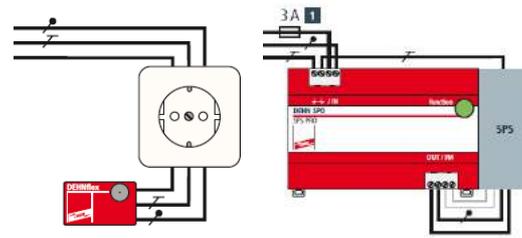


Abbildung 4: Links: Absicherung einer Steckdose mit Typ 3 Ableitern, rechts: Absicherung einer Industriemaschine mit Typ 3 Ableitern

4 Kritische Würdigung

Schutz gegen Überspannungen ist ein relevantes Forschungsthema. Wie wichtig eine neue Technologie sein kann zeigt sich zum Beispiel in den neuen verschleißfreien Funkenstrecken welche zusätzlich keinen Netzfolgestrom zulassen. Dies spart Wartungsarbeiten, und teurere Reparaturen. Die Vermeidung von Verdienstauffällen erhöht die Nachfrage nach diesen Technologien.

5 Zusammenfassung/Fazit

Große und teure Industrieanlagen vor Überspannungen zu schützen ist für eine effiziente Produktion nicht zu vernachlässigen. In Zeiten der Energiewende muss immer häufiger zwischen den verfügbaren Energieressourcen gewechselt werden und Kraftwerke müssen ans Netz geschaltet bzw. von Netz genommen werden. Somit steigt das Risiko von netzinternen Überspannungen welche, ohne richtigen Schutz, große Schäden verursachen können.

Mit einem guten Überspannungsschutz im Haus besteht ein wartungsfreies und nicht störanfälliges Schutzsystem. Dies lässt sich, sofern diese Ableiter an der richtigen Stelle angeschlossen werden, durch den Einbau von Überspannungsableitern von Typ 1 bis Typ 3 umsetzen. Hierfür gibt es je nach Wert und Leistungsumsatz der zu schützenden Anlage ein breites Spektrum an passenden Ableitern und Schutzkonzepten.

6 Literatur

- [1] Dehn Blitzplaner, 3. aktualisierte Auflage, 2015
- [2] EMV - Blitzschutz von elektrischen und elektronischen Systemen in baulichen Anlagen, Landers, E. U. ; Zahlmann, P.
- [3] Basiswissen Überspannungsschutz von Phoenix Contact
- [4] Handbuch für Blitzschutz und Erdung, Peter Hasse, Johannes Wiesinger, Wolfgang Zieschank
- [5] <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0208032.htm>



Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen

Felix Fitzl – 20.01.2016

Gliederung

- **Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz**
- **Äußerer Blitzschutz**
- **Innerer Blitzschutz**
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- **Beispielvideo**
- **Umsetzungsbeispiel**
- **Zusammenfassung**
- **Quellen**

Gliederung

▪ Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz

▪ Äußerer Blitzschutz

▪ Innerer Blitzschutz

- Überspannungsschutz Typ 1-3
- Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode

▪ Beispielvideo

▪ Umsetzungsbeispiel

▪ Zusammenfassung

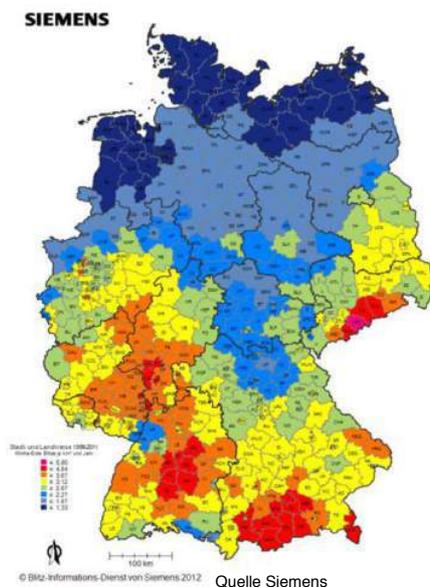
▪ Quellen



20.01.2016 | Felix Fitzll | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 3



Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz

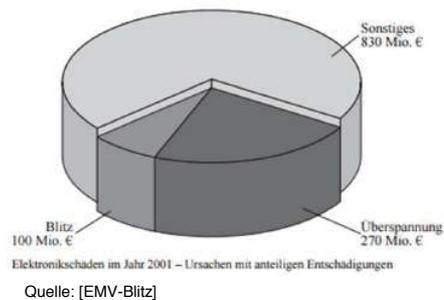


LEMP - Lightning Electromagnetic Pulse

- Vergleichsweise selten
- gefährlicher

SEMP - Switching Electromagnetic Pulse

- Zu/Abschalten leistungsstarker induktiver Verbraucher oder Transformatoren
- Arbeiten am Stromnetz

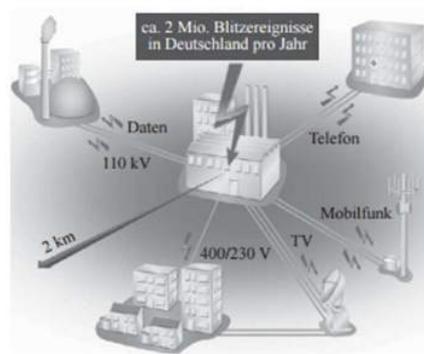


20.01.2016 | Felix Fitzll | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 4



Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz

- Permanent stromdurchflossene elektrische Verbraucher (Router, Server etc.)
- Sekundärschäden auch von entfernten Einschlägen noch möglich
- Induktive Einkopplung möglich (auch in Datenleitungen)



Gefährdung durch eine Blitzentladung im Umkreis von 2 km um den Einschlagsort

Quelle: [EMV-Blitz]

Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- Beispielvideo
- Umsetzungsbeispiel
- Zusammenfassung
- Quellen

Äußerer Blitzschutz



Gefährdungsklassen	Ableitstrom [KA]	Radius [m]
I	200	20
II	150	30
III	100	45
IV	100	60

Blitzschutzkugeln

- Blitz bewegt sich stufenweise fort, nicht kontinuierlich
- Stufenlänge steigt mit Stromstärke an
- 4 genormte Gefährdungsklassen
- Spitze des Blitzes im Mittelpunkt der Kugel
- Kugeloberfläche bildet Äquipotentialfläche des elektrischen Feldes
- Alle Berührungspunkte der Kugel sind potentielle Einschlagstellen
- Kugelradius durch Entfernung der Fangstangen wählbar



Quelle: [Deh-15]

20.01.2016 | Felix Fitzl | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 7



Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- Beispielvideo
- Umsetzungsbeispiel
- Zusammenfassung
- Quellen



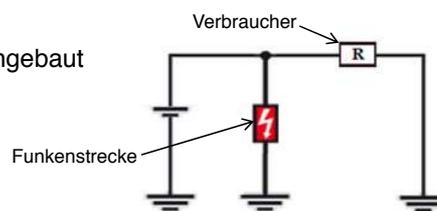
20.01.2016 | Felix Fitzl | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 8



Innerer Blitzschutz

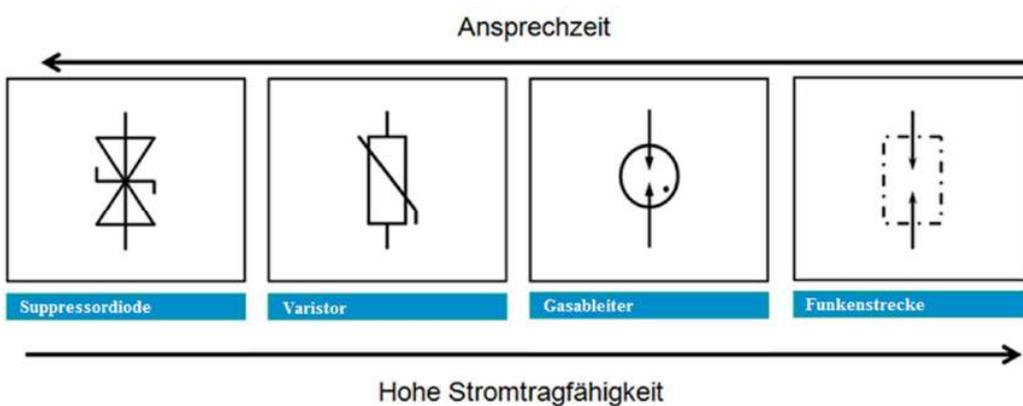
Überspannungsschutz Typ 1-3

- Erste Schutzebene schon im Versorgungsnetz
- Überspannungsschutz im Haus aufgeteilt in 3 Stufen (Grobschutz, Mittelschutz und Feinschutz)
- aufeinander aufgebaut und voneinander abhängig
- Schutzstufen sind wegen der dazwischen liegenden induktiven Leitungen voneinander entkoppelt
- Parallel zu der zu schützenden Einrichtung eingebaut



Innerer Blitzschutz

Überspannungsschutz Typ 1-3



Quelle [Phoe]

Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- **Innerer Blitzschutz**
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
 - Beispielvideo
 - Umsetzungsbeispiel
 - Zusammenfassung
 - Quellen



20.01.2016 | Felix Fitzl | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 11



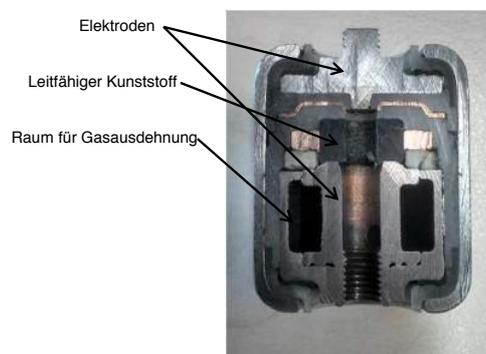
Innerer Blitzschutz

Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode

- **Typ 1: Grobschutz im Hauptverteiler**
- Blitzstromableiter; erste und wichtigste Komponente
- Setzt Spannung auf 1300 – 6000V herab (Modellabhängig)
- Funkenstrecke verträgt höhere Ströme als der Gasableiter und löscht selbstständig
- Kosten pro Stück ca. 40€ für eine Funkenstrecke und 3,50€ für einen Gasableiter



Quelle [Conrad]



Quelle: elenia



20.01.2016 | Felix Fitzl | Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 12



Innerer Blitzschutz

Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode

- **Typ 2: Mittelschutz im Etagenverteiler**
- Senkt die Spannung weiter auf 600 - 2000V
- Realisiert durch Varistoren
- Kosten pro Stück ca. 0,56€



Quelle: [Conrad]

Innerer Blitzschutz

Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode

- **Typ 3: Feinschutz auf Steckdosenebene**
- Senkt die Überspannung weiter auf für Endgeräte schadlos erträgliche Pegel
- Verwendung von Suppressordioden
- In vielen Ländern schon gesetzlich in Endgeräten vorgeschrieben (erkennbar an "CE-Zeichen")
- Auch für Telefon, TV und Ethernetkabel
- Kosten pro Stück ca. 1,50€



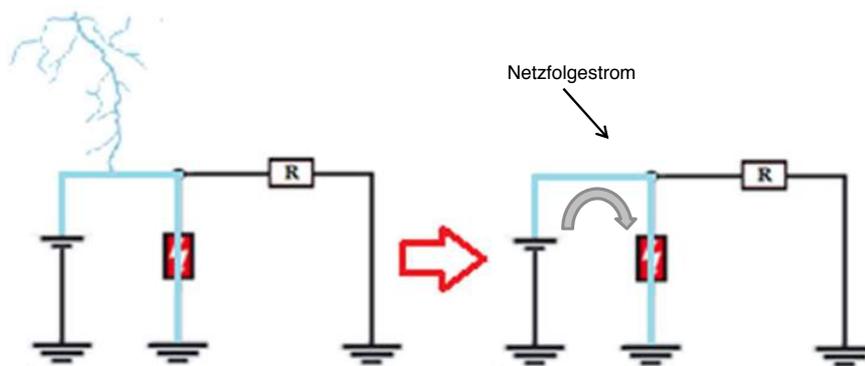
Quelle: [Conrad]

Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- Beispielvideo
- Umsetzungsbeispiel
- Zusammenfassung
- Quellen

Netzfolgestrom

- unerwünschtes Phänomen, nachdem Ansprechen der Funkenstrecke
- Versorgungsspannung \approx Glimmspannung \rightarrow Funkenstrecke bleibt leitfähig



Beispielvideo

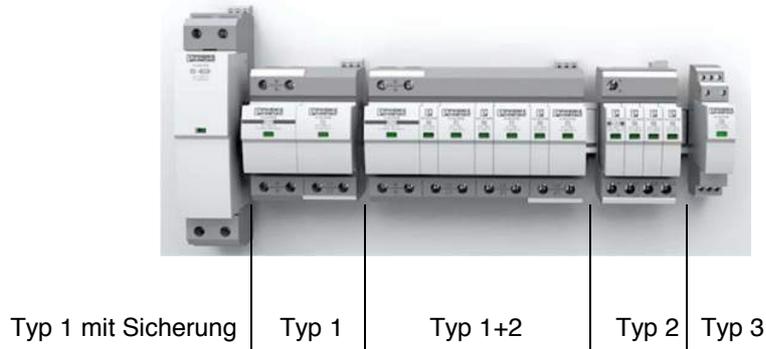


Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- Beispielvideo
- Umsetzungsbeispiel
- Zusammenfassung
- Quellen

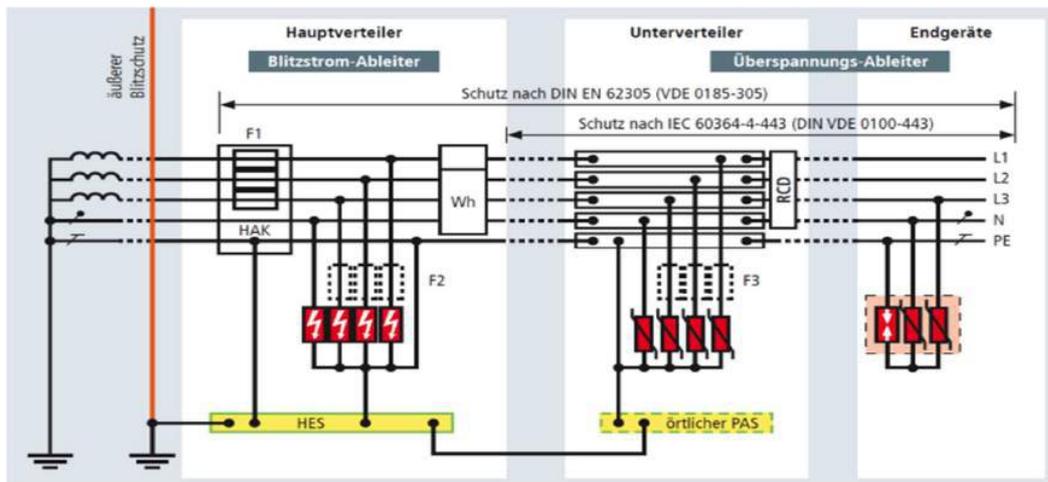
Umsetzungsbeispiel

Phoenix Contact:



Quelle: [Phoe]

Umsetzungsbeispiel



Quelle: [Deh-15]

Umsetzungsbeispiel

Beispiel: Phoenix Contact	Ableitstrom [KA]	Preis [€]
Überspannungsschutztyp 1	100	140
Überspannungsschutztyp 1+2	25	340
Überspannungsschutztyp 2	20	220
Überspannungsschutztyp 3	1	80

- Für ein Einfamilienhaus mit 2 Etagen und 15 geschützten Steckdosen werden ca. 3000€ inkl. Installation benötigt.

Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
- Beispielvideo
- Umsetzungsbeispiel
- Zusammenfassung
- Quellen

Zusammenfassung

- Zuverlässiger und wirkungsvoller Schutz gegen Schäden an elektronischen Geräten, vor allem in heutiger Zeit bei permanent aktiven Geräten
- Einmalige Investition und lange Lebensdauer
- Schutz vor Notabschaltung der Spannung
- Wartungsfrei



Quelle: [Dehn + Söhne GmbH]

Gliederung

- Allgemeine Bedeutung von Blitzschutz
- Äußerer Blitzschutz
- Innerer Blitzschutz
 - Überspannungsschutz Typ 1-3
 - Varistoren, Gasableiter, Funkenstrecke, Suppressordiode
 - Beispielvideo
 - Umsetzungsbeispiel
 - Zusammenfassung
 - Quellen

Quellen

- [Deh-15] Dehn Blitzplaner
- [EMV-Blitz] EMV - Blitzschutz von elektrischen und elektronischen Systemen in baulichen Anlagen, Landers, E. U. ; Zahlmann, P.
- [Phoe] Basiswissen Überspannungsschutz Phoenix Contact
- Handbuch für Blitzschutz und Erdung, Peter Hasse, Johannes Wiesinger, Wolfgang Zieschank
- [Pheo] <https://www.phoenixcontact.com/>
- http://www.controllersandpcs.de/lehrarchiv/pdfs/elektronik/pass01_05x.pdf
- <http://www.conrad.biz/ce/>



20.01.2016| Felix Fitzl| Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen | Seite 25



Umsetzung von Blitzschutzkonzepten in Eigenheimen

Felix Fitzl – 20.01.2016

Auftriebskraftwerke für die mögliche Stromversorgung von Einfamilienhäusern

Buoyant force power plants for possible electrical power supply of private homes

B.Sc. Julia Gartner, Braunschweig, j.gartner@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Die Nutzung erneuerbarer Energien wird immer wichtiger. Die Fa. *Rosch Innovations* führt derzeit eine neues Kraftwerk ein, das auf einer alten Idee basiert: Die Nutzung der Auftriebskraft für die Erzeugung von Energie. Bereits viele Firmen haben sich an dieser Entwicklung versucht, aber niemand hat den Durchbruch geschafft. Nun behauptet Fa. *Rosch Innovations* eine Möglichkeit gefunden zu haben. In einem ca. 10m hohen Behälter befinden sich Wasser und Schaufeln, die am Boden durch einen Kompressor mit Luft befüllt werden. Diese dienen als Auftriebskörper, die an einem Kettentrieb befestigt sind. Die kinetische Energie wird mithilfe eines Generators in elektrische Energie umgewandelt [1]. Diese elektrische Energie wird für die Versorgung des Kompressors und der Verbraucher im Einfamilienhaus verwendet. Nach Aussage von Fa. *Rosch Innovations* wird nur für den erstmaligen Antrieb Energie von außen benötigt, danach läuft die Anlage autark [2]. Aber genau hier greift der Energieerhaltungssatz, der diesem Funktionsprinzip widerspricht! Kein System kann ohne weitere äußere Energiezufuhr endlos in Bewegung bleiben, denn Perpetuum mobiles existieren nicht. Dieser Aspekt war der Anlass für weitere Untersuchungen, um herauszufinden, von wo Energie hinzugeführt wird, damit das Auftriebskraftwerk in Bewegung bleibt.

Abstract

The usage of renewable energies is becoming more important than ever. The company *Rosch Innovations* is currently introducing a new power plant based on an old idea: the utilization of buoyant force power plants producing electricity for private homes. Many companies have tried to develop a power station alike, yet no one succeeded. *Rosch Innovations* claims to have found a working solution. In a 10 meter high container filled with water one finds paddles, which, at the bottom are filled with compressed air. Working as a flotation device those paddles are connected to a generator producing electricity [1]. Some of the produced energy is used to keep the system running, the rest can be used in the private home or stored. *Rosch Innovations* states that only for the first empowering energy has to be put into the cycle, afterwards it is self-sustaining [2]. Yet the system contradicts the law of conservation of energy, since no system in motion will stay in motion without an external energy supply – consequently a perpetual motion machine does not and cannot exist. There is a common interest for figuring out where energy is being put into the system.

1 Einleitung

Die Reichweite von gewinnbaren Rohstoffen ist begrenzt und global gesehen wird der Energiebedarf stetig zunehmen. Des Weiteren muss der CO₂-Ausstoß verringert werden, um die Umweltbelastung zu reduzieren. Deswegen werden langfristig erneuerbare Energien als Energiequelle immer wichtiger. Durch ständige Weiterentwicklung werden derzeit u.a. verstärkt PV-Anlagen und Windkraftanlagen aufgebaut. Diese zwei Formen von erneuerbaren Energien (EE) sind jedoch abhängig von verschiedenen Bedingungen, wie z.B. Tageszeit, Wetter, etc. Aus diesem Grund wird die Nutzbarkeit weiterer EE ebenso nachgegangen. So hat die Fa. *Rosch Innovations* ein Kraftwerk konstruiert, das den Auftrieb für die Erzeugung von elektrischer Energie nutzt. Da diese Kraftwerksart erstmals nach Aussage von Fa. *Rosch Innovations* in hoher Anzahl in Deutschland Anwendung finden soll [2], unterstützte dies die Motivation der Funktionsweise nachzugehen.

2 Theoretische Grundlagen

Der Energieerhaltungssatz ist eine der grundlegendsten Prinzipien in den Naturwissenschaften: „In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien konstant. Die Gesamtenergie bleibt erhalten.“ [3] Daraus folgt, dass Energien umgewandelt werden können, aber Energie weder erzeugt noch verloren gehen kann. Dies widerlegt die Existenz von Perpetuum mobiles, Systeme, die durch einmaliger Energiezufuhr von außen endlos in Bewegung bleiben. Hierbei spricht man von einem Perpetuum mobile 1. Art [3].

Ein Beispiel hierfür ist ein System aus einem Akku, der eine Lampe mit Strom versorgt. Das erzeugte Licht wird über ein Fotoelement wiederum zur Stromerzeugung genutzt, worüber der Akku und weitere Verbraucher gespeist werden. In diesem Fall würde im System Energie erzeugt werden, der Wirkungsgrad wäre über 100%. Dies ist aufgrund des Energieerhaltungssatzes jedoch nicht möglich. Bei der Energieerzeugung muss immer eine Energie von außen zugeführt werden [3].

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Im Folgenden wird der Aufbau sowie die Arbeitsweise vom Auftriebskraftwerk der Fa. *Rosch Innovations* näher erläutert, um mit diesem Hintergrundwissen anschließend auf die Energien im System eingehen zu können.

3.1 Aufbau des Auftriebskraftwerkes

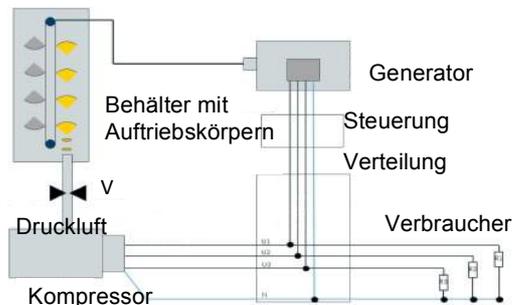


Abb. 1: Skizze zum Aufbau des Auftriebskraftwerkes

In der Abbildung 1 ist ein Behälter zu erkennen, der ca. 10m hoch und mit Wasser gefüllt ist. In dem Behälter befinden sich die Auftriebskörper, die man sich wie Schaufeln vorstellen kann, die nach unten geöffnet sind. An der untersten Stelle im Behälter werden die Schaufeln mithilfe eines Kompressors mit Luft befüllt. Dadurch entsteht eine Auftriebskraft. An der obersten Stelle entweicht die Luft aus den Auftriebskörpern und diese sinken wieder zum Boden. Durch einen Kettenantrieb wird die durch den Auftrieb erzeugte mechanische Energie von der oben liegenden Welle auf den Generator übertragen. Die durch den Generator erzeugte elektrische Energie wird einem Schaltschrank zugeführt, der zur Steuerung des Kompressors und Zuschaltung der Verbraucher dient. Von der anschließenden Verteilung wird der Kompressor, der die Druckluft zum Befüllen der Auftriebskörper bereitstellt sowie die Verbraucher im Einfamilienhaus eingespeist [4].

3.2 Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes

Vor dem Anlauf des Kraftwerkes wird der Druckbehälter des Kompressors von einer externen Zufuhr mit Druckluft befüllt. Hierbei wird bereits das Wasser aus einem Teil der Auftriebskörper verdrängt. Währenddessen ist die Anlage mit einer mechanischen Scheibenbremse festgestellt. Nach Befüllung der Hälfte der Auftriebskörper wird der externe Druckluftschlauch entfernt. Nach Lösen der Feststellbremse setzt sich die Anlage selbsttätig in Bewegung und nach Erreichen der Betriebsdrehzahl schalten sich der Kompressor und die Verbraucher automatisch zu. Der Kompressor läuft im Dauerbetrieb und der Kesseldruck beträgt ca. 3,5bar und der Druck in der Zuleitung zum Tank ca. 1,2bar. Die Drehzahl der Anlage und damit die elektrische Frequenz werden durch die Druckluftzufuhr auf 50Hz geregelt, die Spannung beträgt 400V [2]. Die erzeugte Leistung vom Generator beträgt ca. 11kW, wovon 4,5kW als Eigenbedarf für die Versorgung des Kompressors benötigt

werden. 6,5kW könnten somit für die Versorgung von Verbrauchern eines Einfamilienhauses verwendet werden [5]. Dies würde jedoch einem Wirkungsgrad von $\eta > 100\%$ entsprechen! [1] Deswegen bleibt die Frage, an welcher Stelle im System Energie zugeführt wird.

3.3 Durchgeführte Messungen

Um herauszufinden, wo die Energiezuführung stattfindet, wurden bereits einige Messungen von einem unabhängigen Gutachter, der eine zuverlässige Quelle darstellt, jedoch aus verschiedenen Gründen nicht genannt werden darf, durchgeführt [5].

3.3.1 Strom- und Spannungsmessung

Der Strom und die Spannung wurden zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen und aufgezeichnet. Die Spannungsmessung ergab einen Scheitelwert von ca. 320V pro Phase. Dies entspricht einem Effektivwert von ca. 227V und befindet sich nach IEC60038 innerhalb der erlaubten Spannungsschwankung von $230V \pm 10\%$. Der gemessene Strom hat im Maximum einen Wert von ca. 23A und somit effektiv ca. 16A pro Phase [5].

3.3.2 Leistungsfaktor $\cos\phi$

Der Leistungsfaktor wurde zu verschiedenen Zeitpunkten über einen Zeitraum von jeweils 10 Minuten gemessen. Es wurde bei drei durchgeführten Messungen ein Leistungsfaktor von knapp 0,98 ermittelt [5]. Der Leistungsfaktor beschreibt die Übertragungsverluste und beträgt im Idealfall 1. In diesem Fall liegt ein sehr guter Leistungsfaktor vor, da sich der Wert nahe 1 befindet.

3.3.2 Leistungsmessung am Kompressor und

Bei dieser Messung sollte kontrolliert werden, wie viel Leistung vom Generator erzeugt und vom Kompressor verbraucht wird. Es wurden jeweils mehrere Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten über einen Zeitraum von 10 Minuten durchgeführt.

Die durch den Generator erzeugte Leistung beträgt ca. 10,7kW, die vom Kompressor benötigte Leistung im Mittel ca. 4,31kW [5].

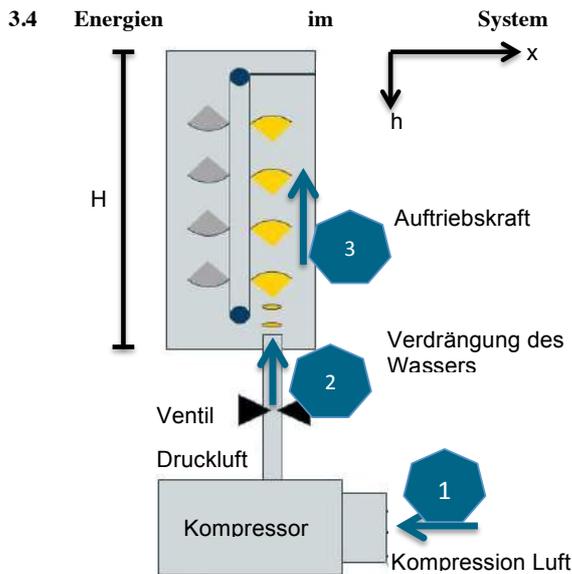


Abbildung 2: Vorhandene Energien im System

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben ist herauszufinden, von wo die Energiezuführung erfolgt, damit das System laufen kann. Deswegen werden in diesem Teil die vorhandenen Energien untersucht.

3.4.1 Kompression der Luft

Die erste Energie, die benötigt wird, ist die zur Komprimierung der Luft mithilfe des Kompressors vom Umgebungsdruck auf den Druck bei gegebener Wassertiefe H [6].

Der Druck im Wasser setzt sich aus dem Umgebungsdruck p_1 und dem Druck im Wasser abhängig von der Tiefe (hier: H) zusammen [6].

$$p_2 = p_U + \rho_W g H$$

Das Volumen V_1 des Wassers wird auf V_2 komprimiert [6].

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2}$$

Die benötigte Energie hierfür ergibt sich zu [6]:

$$E_{komp} = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Um nun mit absoluten Energien zu rechnen, wird die Energie des Umgebungsdruckes berücksichtigt [6].

$$E_1 = E_{komp} - E_U$$

$$E_1 = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - p_U (V_1 - V_2)$$

3.4.2 Verdrängung des Wassers aus den Auftriebskörpern

Um das Wasser aus den Auftriebskörpern zu verdrängen, muss das Luftvolumen V_2 gegen den Druck p_2 im Behälter gedrückt werden. Unter Berücksichtigung des Umgebungsdruckes erhält man folgende Energie [6]:

$$E_2 = (p_2 - p_1) V_2$$

3.4.3 Auftriebskraft

Als resultierende Kraft erhält man die Auftriebskraft [6]

$$F_A(h) = -V(h) \Delta \rho g$$

mit $\Delta \rho = \rho_W - \rho_L \approx \rho_W$, da $\rho_W \gg \rho_L$ gilt.

Das negative Vorzeichen ergibt sich aus dem gewählten Koordinatensystem [6].

Das Volumen der Luftblase verändert sich ebenfalls mit der Wassertiefe h .

$$V(h) = V_1 \frac{p_1}{p(h)}$$

Allgemein wird Energie beschrieben durch das Produkt aus Kraft und Weg. Da sich die Auftriebskraft über den Weg abhängig von der Wassertiefe ändert, wird integriert [6].

$$E_3 = \int_h^0 -V_1 \frac{p_1}{p_U + \rho_W g h} \rho_W g dh$$

$$E_3 = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

3.4.4 Energiebilanz

Betrachtet man nun alle Energie, erhält man [6]

$$E_{Bilanz} = -E_1 - E_2 + E_3$$

Nun werden die Werte eingesetzt:

$$E_{Bilanz} = - \left(p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - p_U (V_1 - V_2) \right) - (V_2 (p_2 - p_1)) + p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Die grau hinterlegten Terme kürzen sich weg. Nach weiterer Ausmultiplikation erhält man [6]:

$$E_{Bilanz} = p_1 V_1 - p_1 V_2 - p_2 V_2 + p_1 V_2$$

Nach Kürzen der grau hinterlegten Termine, ergibt sich

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

Dies entspricht dem Gesetz von Boyle-Mariotte und gilt für isotherme Kompression bei konstanter Temperatur [6].

Somit bleibt keine Energie für die Bilanz übrig, um den Verbraucher zu versorgen [6].

$$E_{Bilanz} = -E_1 - E_2 + E_3 = 0$$

4 Kritische Würdigung

Bei Bearbeitung des Themas stand von Anfang an die Frage im Raum, wie das Auftriebskraftwerk funktionieren kann und von wo die Energie hinzugeführt wird. Im vorangehenden Teil wurden diese Punkte in Rahmen von Messungen und Betrachtungen zu den Energien im System untersucht. Es konnte nicht herausgefunden werden, an welcher Stelle die Energiezuführung stattfindet. Auf jeden Fall steht fest, dass ohne Energiezufuhr das System nicht funktionieren kann, da dies dem Energieerhaltungssatz widerspricht.

Jedoch bleibt es gerechtfertigt sich mit diesem Thema zu befassen, da die *Fa. Rosch Innovations* nach ihrer

Aussage bereits um die 500 Auftriebskraftwerke an Privatpersonen verkauft hat [2]. Außerdem konnten die Messungen ebenfalls nichts Negatives belegen.

Solange die Funktionsweise nicht vollständig aufgeklärt ist, bleibt jedoch abzuwarten, inwieweit die Auftriebskraftwerke zuverlässig arbeiten und Strom produzieren. Zukünftig bleibt das Auftriebskraftwerk kritisch zu betrachten. Wenn eine Aufklärung zur Funktionsweise erfolgen würde, würde dies einen enormen Durchbruch im Bereich der Stromerzeugung mittels erneuerbaren Energien bedeuten. Mit der Einführung von Auftriebskraftwerken für Einfamilienhäuser würde eine rasante Senkung des Strompreises unter gleichzeitiger CO₂-Reduzierung einhergehen. Dies hätte eine große Bedeutung für die Weiterentwicklung der Energieerzeugung mittels erneuerbarer Energie.

5 Zusammenfassung/Fazit

Zusammenfassend kann man festhalten, dass das Auftriebskraftwerk ohne die Zuführung von externer Energie nicht funktionsfähig ist, da dies dem Energieerhaltungssatz widerspricht. Wenn die Umsetzung funktionieren sollte, würde das wie bereits unter Kapitel 4 genannt einige Vorteile für die zukünftige Stromerzeugung bedeuten.

Auch wenn die Frage zur Funktionsweise nicht geklärt werden konnte, ist das Auftriebskraftwerk weiterhin ein interessantes Thema, das jeder selbst abwägen sollte und bei dem die zukünftige Entwicklung völlig offen ist.

6 Literatur

- [1] Prof. Alfred Evert: Rosch AG: Flexibles Auftriebs-Kraftwerk, unter http://www.borderlands.de/net_pdf/NET0514S23-29.pdf (abgerufen am 01.02.2016)
- [2] Rosch Innovations Deutschland GmbH, unter <http://rosch-innovations.de> (abgerufen am 01.02.2016)
- [3] Nicaro Handel UG: Perpetuum-mobile.de, unter: <http://www.perpetuum-mobile.de/perpetuum-mobile-1-art.html> (abgerufen am 27.01.2016)
- [4] Gaia Energy: Auftriebskraftwerk in Kooperation mit der Rosch Gruppe, unter http://gaia-energy.org/wp-content/uploads/2014/07/Auftriebskraftwerk-infofolder_v2.pdf (abgerufen am 27.01.2016)
- [5] Vorortbegehung und Durchführung der Messungen durch einen unabhängigen technischen Gutachter [REDACTED], 29.09.2015.
- [6] Dipl.-Ing. Peter Brugmüller: Wirkungsgrad eines Auftriebskraftwerks, unter <http://gaia.ws1.eu/files/Wirkungsgrad> (abgerufen am 01.02.2016)



Auftriebskraftwerke zur möglichen Stromversorgung von Einfamilienhäusern

Julia Gartner, 02.02.2016

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Einleitung

- Stromversorgung mit erneuerbaren Energien
- CO₂-Einsparung
- „Alte“ Idee neu entwickelt
- Fa. Rosch Innovations verkauft bereits Auftriebskraftwerke



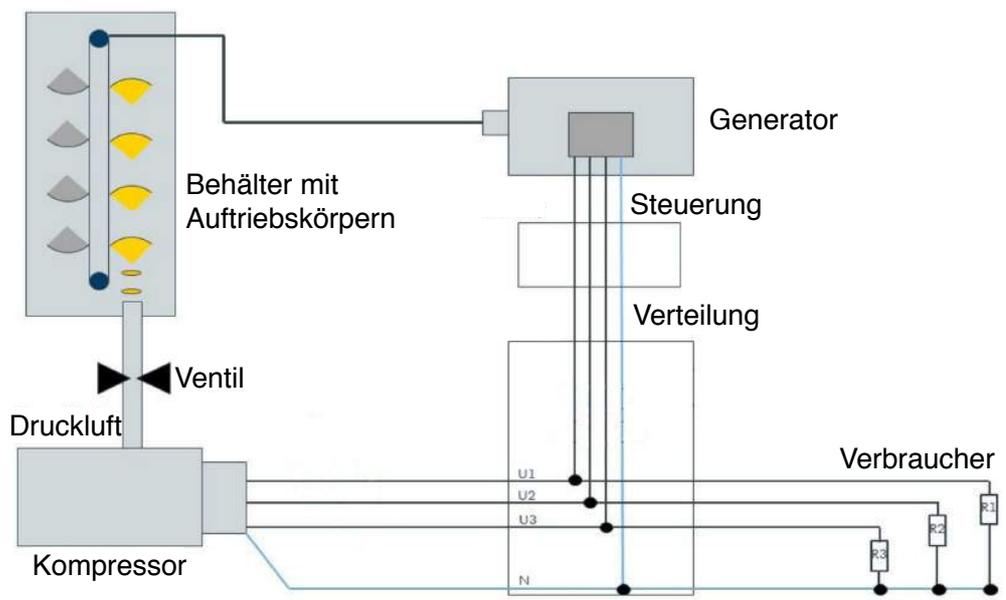
http://linha-heizung.de/uploads/images/erneuerbare_energie.jpg

Kraftwerk, das viele Fragen aufwirft.

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Aufbau des Auftriebskraftwerkes



Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 7



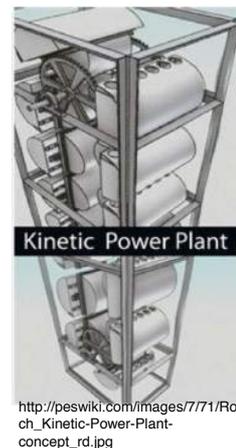
Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes

Behälter mit Auftriebskörpern

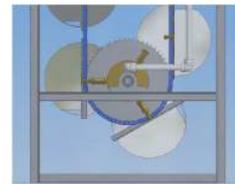
- Auftriebskörper sind nach unten geöffnet
→ Befüllung mit Druckluft
- Auftriebskraft bewegt Körper nach oben
- Antrieb des Generators über Kettengetriebe und Welle

→ Nutzung der elektrischen Energie für Versorgung
- Kompressor (4,5kW)
- Verbraucher (6,5kW)

Auftriebsleistung von 11kW
 $\eta > 100\%$
Woher kommt die Energie?



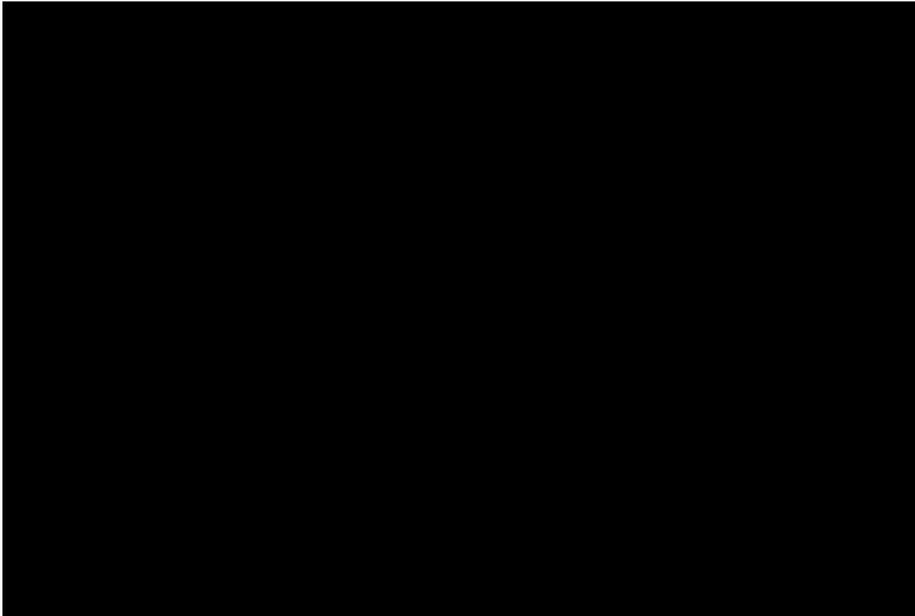
http://peswiki.com/images/7/71/Rosch_Kinetic-Power-Plant-concept_rd.jpg



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 8



Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes



Video3.mp4

Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes

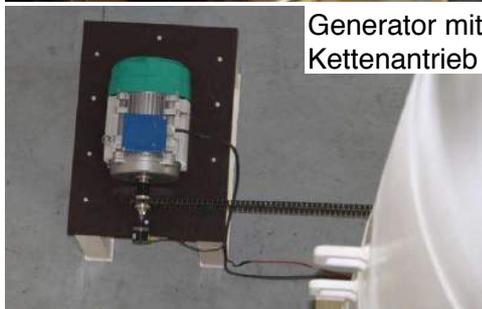
Behälter mit Auftriebskörpern



Auftriebskörper



Generator mit
Kettenantrieb



Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes



Steuerschrank, Verteilung und Kompressor

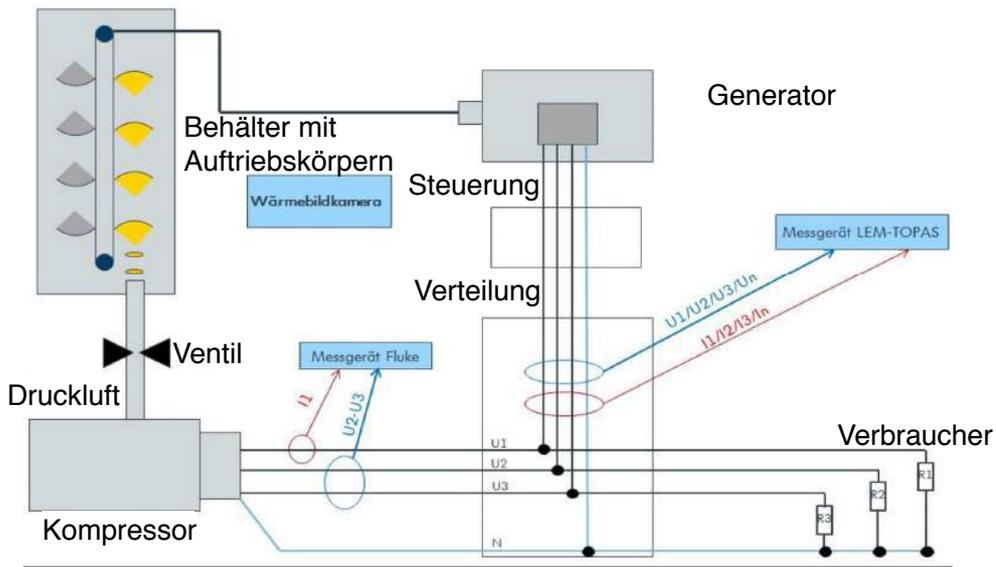


Heizwiderstand als Last

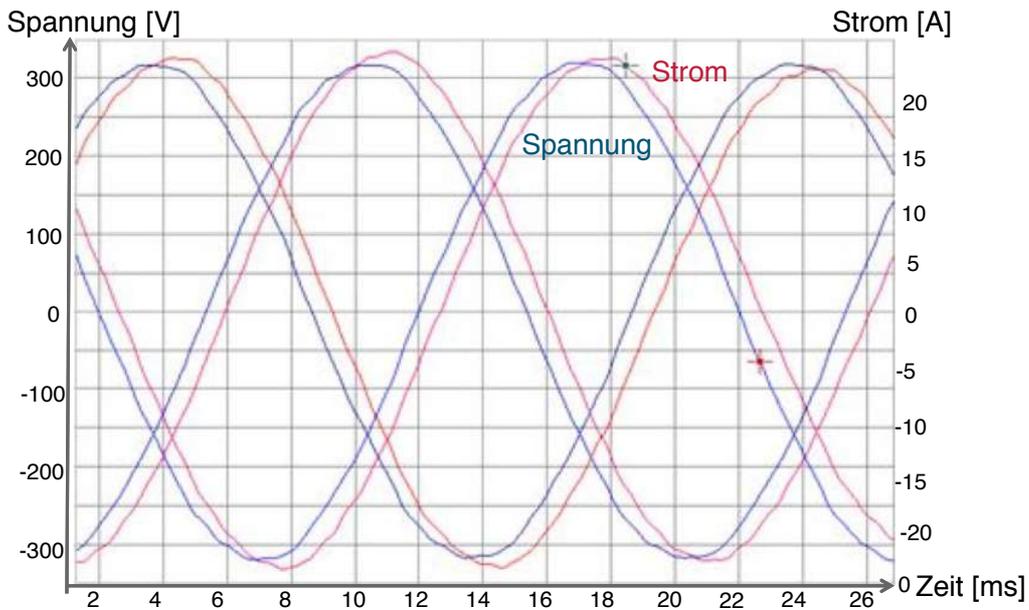
Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

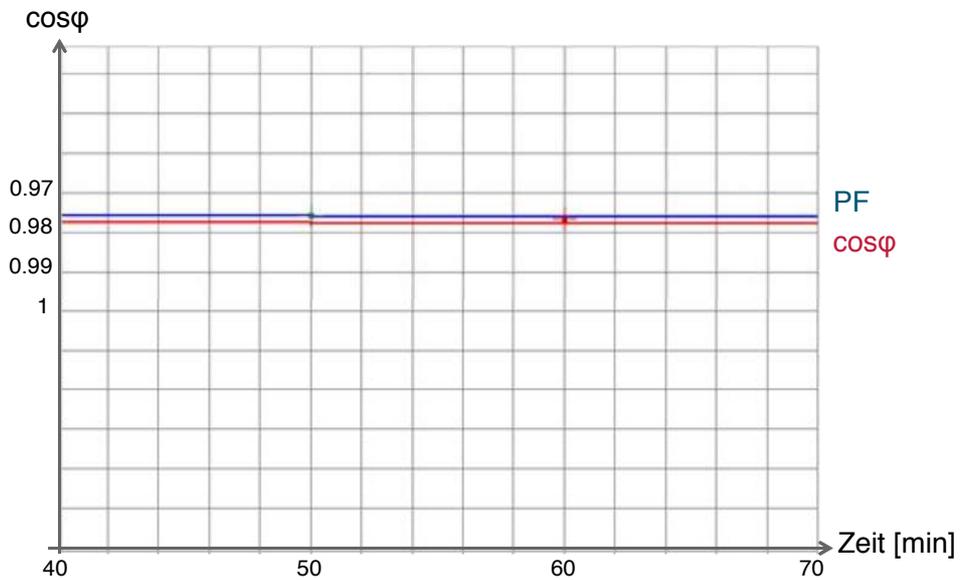
Durchgeführte Messungen



Durchgeführte Messungen

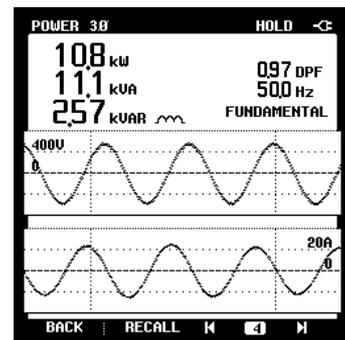
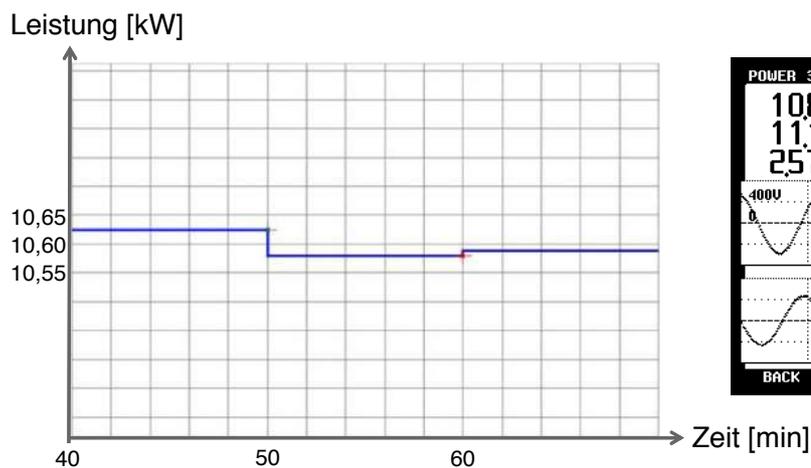


Durchgeführte Messungen



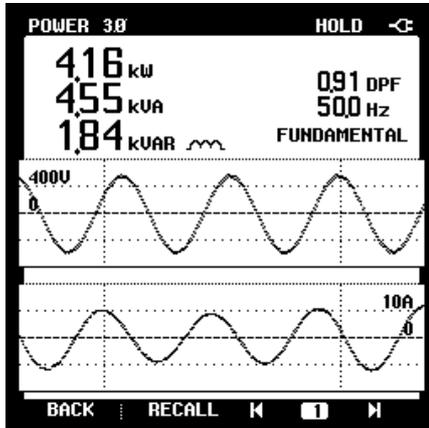
Durchgeführte Messungen

Leistung Generator

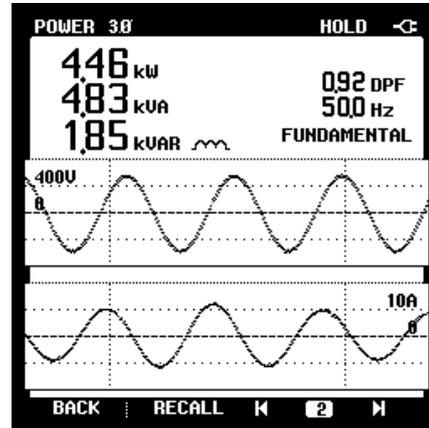


Durchgeführte Messungen

Leistung Kompressor



Zeitpunkt 1



Zeitpunkt 2

Durchgeführte Messungen

Wärmebildkamera



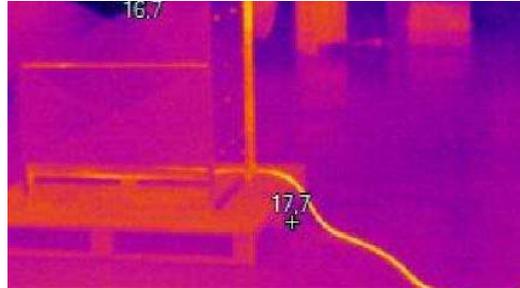
Generator im Betrieb, inkl. Zuleitung

Durchgeführte Messungen

Wärmebildkamera



Kompressor und 3 Leuchten als Verbraucher



Heizwiderstand und Zuleitung

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Daten und Fakten

Auftriebskraftwerk für ein Einfamilienhaus – Beispiel:

- 5-6 kW
- Einmalig ca. 12.000€
- Platzbedarf: 0,5m x 0,5m, Bauhöhe ca. 10m
- Aufstellung im Erdreich möglich
- 1x pro Jahr Austausch Verschleißteile
- 12 Monate Garantie auf Generator und Kompressor
- Umsetzung 2 – 3 Monate



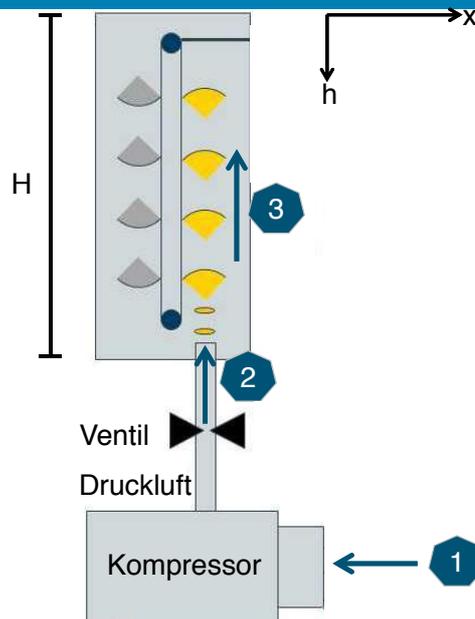
<https://i.ytimg.com/vi/ur9eerZXCXM/maxresdefault.jpg>

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Energien im System

- 1 Kompression Luft
- 2 Verdrängung des Wassers
- 3 Auftriebskraft



Energien im System

- 1 Kompression Luft

Druck in Wassertiefe H

$$p_2 = p_U + \rho_W g H$$

Kleineres Volumen V_2

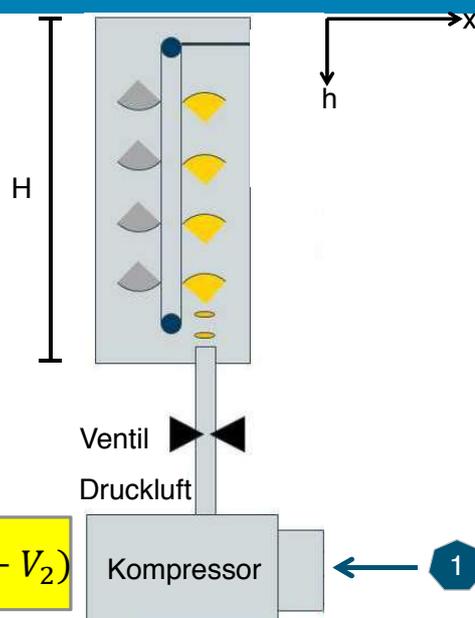
$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2}$$

Benötigte Energie

$$E_{komp} = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$E_1 = E_{komp} - E_U$$

$$E_1 = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - p_U (V_1 - V_2)$$

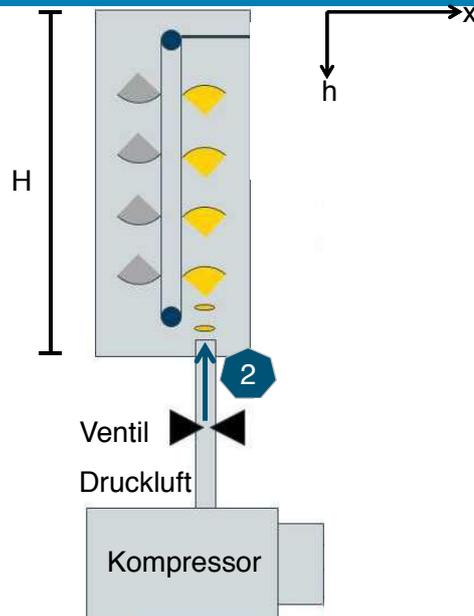


Energien im System

2 Verdrängung des Wassers

$$E_2 = p_2 V_2 - p_U V_2$$

$$E_2 = (p_2 - p_1) V_2$$



Energien im System

3 Auftriebskraft

$$E_3 = \int F_A(h) dh$$

mit

$$F_A(h) = -V(h) \Delta \rho g$$

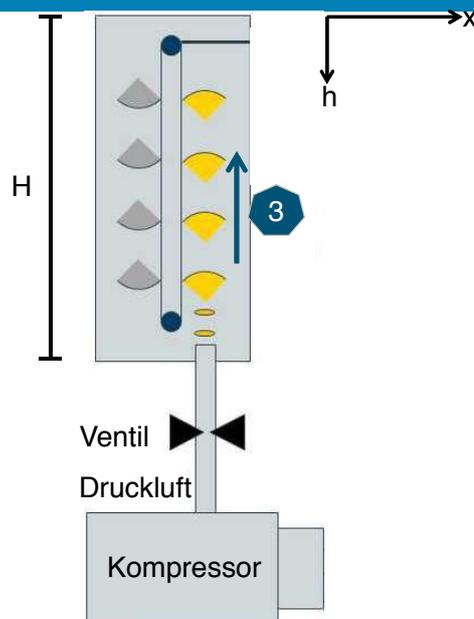
Volumen ändert sich mit h

$$V(h) = V_1 \frac{p_1}{p(h)}$$

$$\text{Näherung } \Delta \rho = \rho_W - \rho_L \approx \rho_W$$

$$E_3 = \int_H^0 -V_1 \frac{p_1}{p_U + \rho_W g h} \rho_W g dh$$

$$E_3 = p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$



Energien im System

Energiebilanz

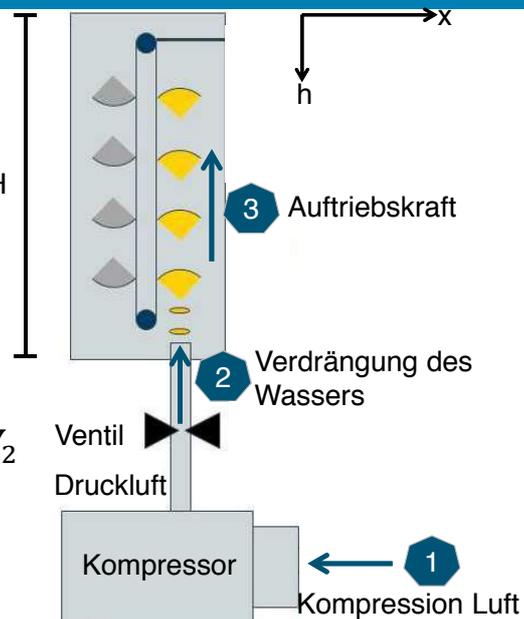
$$E_{Bilanz} = -E_1 - E_2 + E_3$$

$$E_{Bilanz} = - \left(p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) - p_U (V_1 - V_2) \right) - (V_2 (p_2 - p_1)) + p_1 V_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

$$E_{Bilanz} = p_1 V_1 - p_1 V_2 - p_2 V_2 + p_1 V_2$$

Für isotherme Kompression $p_1 V_1 = p_2 V_2$

$$E_{Bilanz} = -E_1 - E_2 + E_3 = 0$$



Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

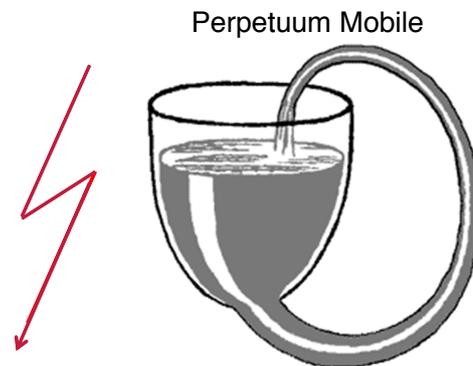
Funktionsweise – Offene Punkte

Aussage Fa. Rosch Innovations:

- Start: Externe Energiezufuhr
- Nach Start Anlage im Inselbetrieb
- Verluste minimiert
- Starke Auftriebskraft

→ Perpetuum mobile 1. Art

Widerspricht dem Energieerhaltungssatz!



<http://www.perpetuum-mobile.de/beispiele-von-perpetuum-mobile.html>

Agenda

- Einleitung
- Aufbau des Auftriebskraftwerkes
- Arbeitsweise des Auftriebskraftwerkes
- Durchgeführte Messungen
- Daten und Fakten
- Energien im System
- Funktionsweise des Kraftwerkes – Offene Punkte
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Funktion ohne Zuführung externer Energie nicht möglich
- Viele Vorteile
- Nachteil: Wo ist der Haken?
- Offen: Woher kommt die Energie?



<http://www.isd.immobilien/img/illustration/aukw-haus-grafik.jpg>

Protection of HVDC Grids, Challenges and Possible Solutions

Fernando Yañez Treviño, B.Sc. Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen. Braunschweig, Germany. f.yanez-trevino@tu-braunschweig.de

Abstract

The construction of a HVDC grid will enable the energy transport over long distances at a reasonable cost. This work provides an overview of the current state of art and protection possibilities for HVDC grids. Compared to AC protection, HVDC grids present additional challenges; their solution approach involving prospective and actual technology is presented. Future research needs are discussed including the construction of a reliable and cost effective circuit breaker as well as the interaction definition between grid components.

1 Introduction

Electric power transmission via high voltage direct current (HVDC) has become increasingly relevant due to its advantages over AC power transmission. For a transmission distance larger than roughly 100 km for cables and 500 km to 800km for overhead lines, HVDC results in a more economical option [1;10]. Renewable energy is commonly available far away from consumers e.g. offshore wind parks; therefore HVDC is preferred over conventional AC in this case. Nowadays HVDC transmission is responsible for the power transmission of more than 15 GW in Europe [9] and operates as point to point (P2P) connections. The future integration of new feed points from renewable energy will require migration from P2P connection to meshed grid topology.

The revolution in scale and interconnection degree between onshore consumption and offshore generation results in the so called supergrid [2]. The enhanced possibility of sharing and drawing resources from other national electricity systems may be achieved through the construction of HVDC grids. However accomplishing this type of grid implies solving current technical challenges and a precise standardization of technology, control and protection methods.

2 HVDC Technology Operation

2.1 Converter Technology

In order to connect DC and AC lines, a converter station in between must be provided. Since the DC line separates the power generation and the onshore AC grid (for offshore wind farms), a phase difference between them is tolerable. Current converter technologies consist of semiconductor components with switch-like behavior. The more conventional current-source converter (CSC) is based on thyristors, which are turn-on only devices and consume reactive power. On the other hand voltage-source converters (VSC) are based on insulated-gate bipolar transistors (IGBT) and can provide reactive power at the receiving and sending end. IGBTs offer greater controllability than thyristors since they can be turned on and off through the gate voltage. VSCs can be controlled via pulse width modulation (PWM) at the IGBTs gates,

while the switching in CSCs depends on the voltage level in the AC side; this means CSCs can feed active loads only whereas VSCs can feed both active and resistive loads. Whether CSC or VSC should be used is ambiguous and the operation parameters of the connection must be considered. However VSCs offer greater flexibility and could facilitate further connections in the HVDC grid [5]. Table 1 presents a comparison between both converter technologies.

	CSC	VSC
Basic element	Thyristor	IGBT
Reactive/active power	Consumes large amount of reactive power	Control over reactive and active power on both ends
Losses	$\approx 0.7\%$	$\approx 1.6\%$
Max. power rating (bipolar)	6400 MW	800 MW
Reversal of power flow direction	Change of pole voltage	Adjust PWM sequence but keep voltage
DC side inductors	Large	Small
DC side capacitors	Small	Large
Rate of rise of DC short-circuit current	Small and controllable	Large

Table 1 Comparison between CSC and VSC [4].

Conversion from DC to AC with a two level VSC produces a square wave with levels $-V_{dc}/2$ and $V_{dc}/2$, where V_{dc} is the voltage between the DC lines. The filtering and smoothing duties to generate a sine wave can be reduced by implementing a multilevel VSC, which produces intermediate voltage steps between the upper and lower values. Improved converter designs include multilevel modularity with switch pairs that reduce fault currents after blocking the IGBTs and allow current flow through just one path. Image 2 shows the electrical circuit for VSC and CSC.

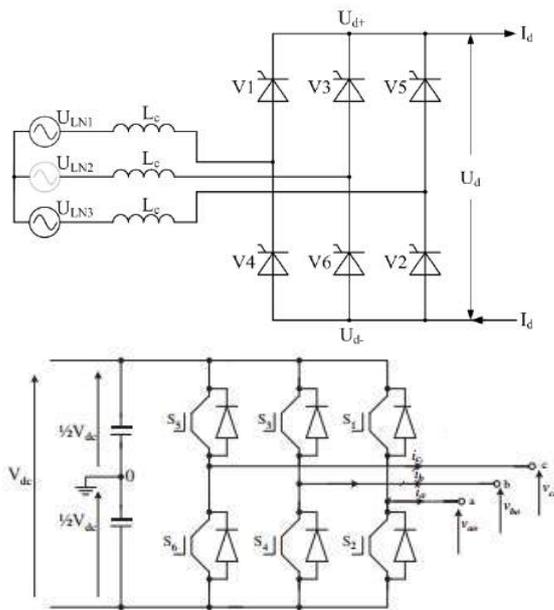


Image 2 Two level voltage source converter (up). Three-phase full wave current source converter (down).

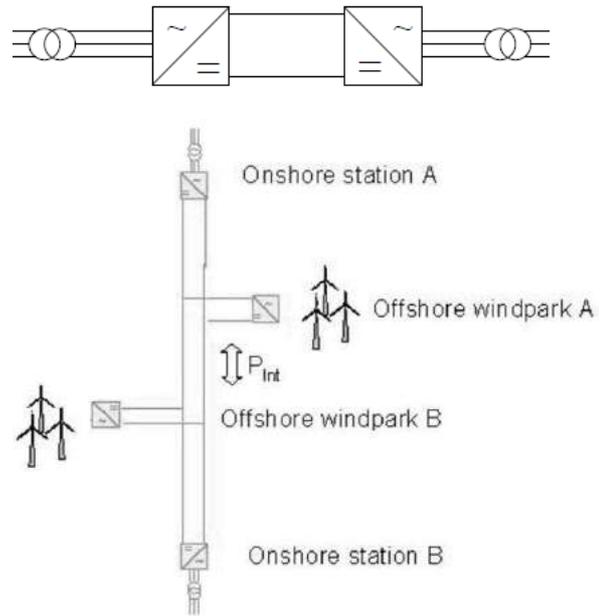


Image 3 Monopolar P2P connection (up) and a HVDC grid composed of 4 terminals (down) [9;12].

Further improvements in the semiconductor technology could come from using wide bandgap materials, which allow single components to have a greater maximum current rating, greater blocking voltage, better switching performance and fewer energy losses. As a result HVDC converters and a potential DC circuit breaker (CB) would consist of fewer components and have lower cost. Actual research focuses in constructing semiconductor components using SiC, GaN and diamond.

2.2 HVDC Grid and P2P Topologies

There are several possibilities for the configuration of HVDC converters. Available topologies can be divided in monopolar and bipolar, depending on the number of converters used at each terminal. The return path can be selected to be ground or metallic return; with or without symmetry. The topology selection varies depending on transmission requirements, budget and environmental limitations. Bipolar topologies allow transmitting twice the power as monopolar topologies. In addition bipolar topologies have the advantage of transmitting half its nominal power in the case of a fault in a DC line. Naturally bipolar topologies cost more than monopolar topologies because additional converters are required. The asymmetric monopole has the advantage of a very low cost and capability of expansion to bipolar if necessary. P2P configurations consist of 2 terminals (monopolar or bipolar) linked by conductors, while a HVDC grid has 3 or more terminals connected. Image 3 presents a transition from P2P topology to a HVDC grid.

3 HVDC Grid Protection

3.1 Migration from P2P to Multiterminal

Multi-terminal systems consist of three or more converter terminals interconnected forming a HVDC grid. Compared to multiple pair configurations, multiterminal HVDC networks require fewer converter stations; this reduces the overall grid cost and power losses. A HVDC grid offers redundancy and thus enhanced transmission reliability. So far the exact scheme to be met by HVDC grids is not completely established. In general AC grid protection characteristics must be adopted by the HVDC grid, these include: sensitivity, selectivity, speed and robustness.

In today's P2P HVDC transmission, DC switches are available for line isolation and CBs on the AC side are responsible for the fault current clearance. A common method in P2P fault identification is the wave analysis of transient voltage and current after a fault. For this method the time difference between first and second reflection at one end or both ends deliver information about the fault location in the line. In a HVDC grid the wave analysis method becomes difficult due to the reflection's complexity at one end and the considerable communication delays between ends [7].

3.2 Fault Detection

Most of the protection systems in AC grids function with detection algorithms for steady-state voltage, such as a Fourier-based decomposition. This type of algorithm becomes useless for HVDC grids if we consider that the steady-state is a constant DC voltage. Therefore a transient-based algorithm must be implemented; the short duration of the transient period in HVDC is an obstacle for its implementation.

The possible faults in a DC grid are line to line and line to ground. The probability of a line to line fault is far lower than a line to ground fault, specially for submarine cables since there is a large distance between them. The probability of a HVDC fault is well documented; overhead HVDC lines have a monopolar fault probability of 0.4 faults/100 km a year, from which roughly 10% correspond to permanent damage with estimated repair time of 24 hours. The permanent bipolar fault incidence is 0.003 faults/100 km a year. Among the main dangers for submarine cables are anchors and fishing activities. Submarine cable faults in the Norwegian coast have an average fault incidence of 2.5×10^{-4} faults/100 k a year [5].

Due to the distances involved, HVDC lines present long communication delays. Non-unit protection, which is based on information about local voltage and/or current at one end, has the advantage of not requiring communication links. Non-unit protection schemes minimize costs and leave out the communication delays and errors. On the other hand, communication between line ends allows differential current fault identification. However exclusive dependence on communication for faults recognition must be avoided [7].

The low impedance in the DC line causes the fault current to reach a high peak value in a short period. In order to diminish the rate of increase and peak in the current, a fault current limiter (FCL) could be implemented. The FCL needs thus to increase the line impedance either self-triggered or externally triggered and to be able to handle large amounts of energy. Different operation principles have been proposed including solid-state limiters, hybrid switches with mechanical operation, superconducting current limiters and more conventional limiting reactors. The placement of a series inductor in the poles serves as a limiting reactor and reduces both the peak fault current and its rate of increase. As the inductor size increases, the peak current decrease is less marked, e.g. replacing a 1mH inductor for 10 mH lowers the peak current more than replacing a 100mH inductor for 200mH. A lower current derivative influences the overcurrent protection triggering, bringing undesired delays in the range of a few milliseconds.

There are three main possible methods for fault detection in HVDC grids and since redundancy desired, it is intended to combine detection algorithms and tools. It is mandatory to block the IGBTs (in the case of VSC) to avoid damage after a fault detection. The first detection

method is known as overcurrent protection and it is designed to protect the converters based on the maximum current rating of the IGBTs and the maximum capabilities of the VSC. An adequate threshold value must be selected and if surpassed according to local measurements, the IGBTs proceed to be blocked.

The second detection method serves to identify the faulty line from the others and it is known as current direction detection. After a fault occurs, IGBTs are blocked and converters feed the fault as bridge rectifiers. The currents at the terminals of the faulty line have opposite directions. When currents with different directions are detected, a signal is triggered to open potential DC CBs. The main disadvantage of the current direction method is the dependence on communication for its operation. Considering a line distance of 50 km, the transmission delay ranges between 0.17 ms and 0.22 ms depending on the transmission medium. Further possible communication delays are due to the data packet size and the line bit rate.

The third fault detection method is known as current derivative detection and it allows locating which line is faulty. The working principle is based on the fact that the derivative of the current is higher for the faulty line than for the rest of the network. The line isolation occurs after the selected current derivative limit is exceeded. The behavior of secondary oscillations must be considered for the threshold selection, since the current derivative can still reach high values. The drawback of this detection method is the high sampling rate required for signal processing of the DC line.

3.3 DC Circuit Breaker

The immediate protection for HVDC lines could be provided by HVDC circuit breakers. The fault clearance in HVDC is more challenging than in AC, since HVDC lines do not have a natural zero crossing to mitigate the electric arc after opening the contacts. As mentioned before, the low impedance of DC lines results in a fast increase of current after a fault, which requires a fast CB and a high energy dissipation capability. For this reason the CB must create an artificial zero current, consume the energy stored in the system's inductance and withstand the voltage response after the interruption [3]. A mechanical CB has a time response relatively slow for HVDC, semiconductor-based CBs come with unpractical high power losses. Significant progress has been achieved on the construction of hybrid CBs (e.g. hybrid DC CB presented by ABB in 2012) combining the acceptable losses of a mechanical CB and the fast response of a semiconductor-based circuit. Image 4 shows a standard model for a hybrid CB.

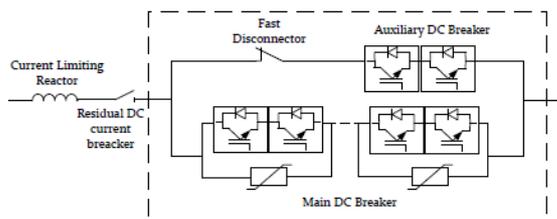


Image 4 Hybrid solid state breaker model with mechanical disconnector [9].

An open grid approach, involving rapid triggering based on local measurements and then closing healthy circuits, would lower the duties on individual CBs. The potential faulty line identification and reclosing criteria are based on the difference between pre-fault and post-fault measurements at each CB. This method is also known as handshaking in analogy to the verification of measurements between the two sides of the CB before closing. Handshaking could be also implemented using DC switches for line isolation and CBs in the AC side of the grid. The local detection of line overcurrent and line undervoltage has the advantage of not requiring intercommunication for the CBs operation [3]. The main drawback of the open grid approach is the participation of the whole grid in the fault clearance, which decreases the selectivity of the protection [7].

4 Conclusions

The construction of a HVDC grid seems likely in the future of power transmission. HVDC grids will likely evolve from existing P2P connections instead of being built all at once [11]. The future evolution to HVDC grids and its protection design represent a market opening for the energy sector. In order to implement a protection system for HVDC grids, clear definition and optimization is needed. Current challenges of building a HVDC grid include:

- Low DC line impedance and fast increase of current
- Long line distances and communication delays
- No steady-state detection algorithm
- No natural zero crossing for line faults
- High sampling rates for derivative calculations
- Complex reflection analysis
- Fast triggering required in potential CBs
- Standardization of technology and protection methods

Possible solutions to achieve a HVDC grid include design improvements and testing of modular multilevel converters, ultra-fast CB design with tolerable losses, semiconductor components research, combined methods and attempts of faults location, combined contemplation of open grid approach with communication support and grid control design oriented to lowering the CB requirements.

5 References

- [1] Marvik, Jorun I. and Svendsen, Harald G. *Analysis of grid faults in offshore windfarm with HVDC connection*. Energy Procedia. Trondheim, Norway, 2013.
- [2] UK Parliament. *A European Supergrid-Energy and Climate Change*. United Kingdom, 2011. Accessed on November 2015 [http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmenergy/1040/104005.htm]
- [3] Alstom. *Implementing the protection and control of future HVDC grids*. Think Grid, 2015. Accessed on November 2015 [http://www.think-grid.org/implementing-protection-and-control-future-hvdc-grids]
- [4] Franck, Christian M. *HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs*. IEEE Transactions on power delivery, vol. 26, no.2, April 2011.
- [5] Kontos, Epameinodas. *Control and Protection of VSC-based Multi-terminal DC Networks*. Department of Electrical Sustainable Energy, TU Delft. Delft, Netherlands, 2013.
- [6] Callavik, Magnus et. al. *The Hybrid HVDC Breaker. An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids*. ABB Grid Systems, Technical Paper. 2012.
- [7] Troitzsch, Constanze. *Netzfehler in vermaschten HGÜ-Netzen. Ein Verfahren zur Berechnung, Detektion, Fehlerklärung*. Universitätverlag Ilmenau. 2014.
- [8] Barker, Carl and Whitehouse, Robert *An Alternative Approach to HVDC Grid Protection*. Alstom Grid, Power Electronics Activities. Stafford, UK, 2010.
- [9] Makino, Yoshinori. *Compendium of all HVDC projects*. International Council on Large Electric Systems. Tokyo, Japan, 2009. Accessed on January 2016 [http://b4.cigre.org/Publications/Other-Documents/Compendium-of-all-HVDC-projects]
- [10] Stenberg, Nikolaos. *The Impact of HVDC Innovations on the Power Industry*. KTH Industrial Engineering and Management. Stockholm, Sweden, 2013.
- [11] Sheridan, E. et.al. *Benefits of Operating a Four HVDC Network with a Normally Open Point*. Control and Power Research Group, Imperial College London. London, UK, 2015.
- [12] Jacobson, Björn. *Developments in Multiterminal HVDC*. ABB Power Systems. IEE EPEC. Winnipeg, Manitoba, 2011.



HVDC Grid Protection, Challenges and Possible Solutions

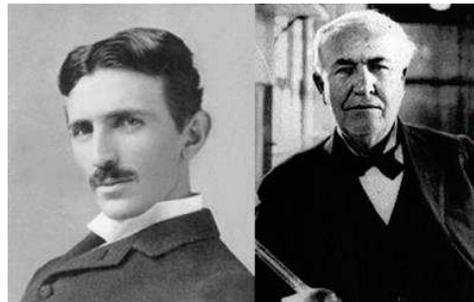
Fernando Yanez Trevino, 03.02.2016

- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary



- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary

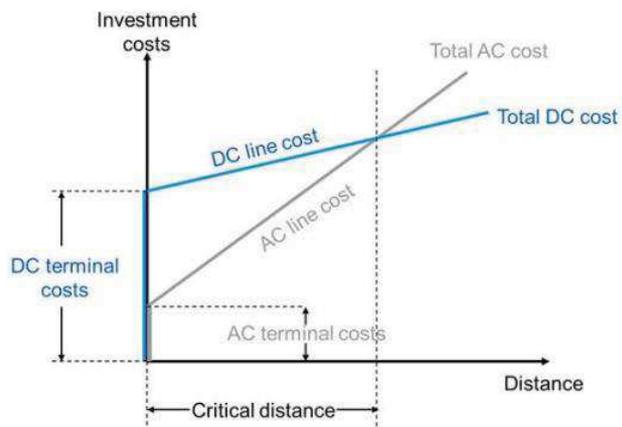
HVDC Origins



AC  **DC**

1890s

Why HVDC instead of HVAC?

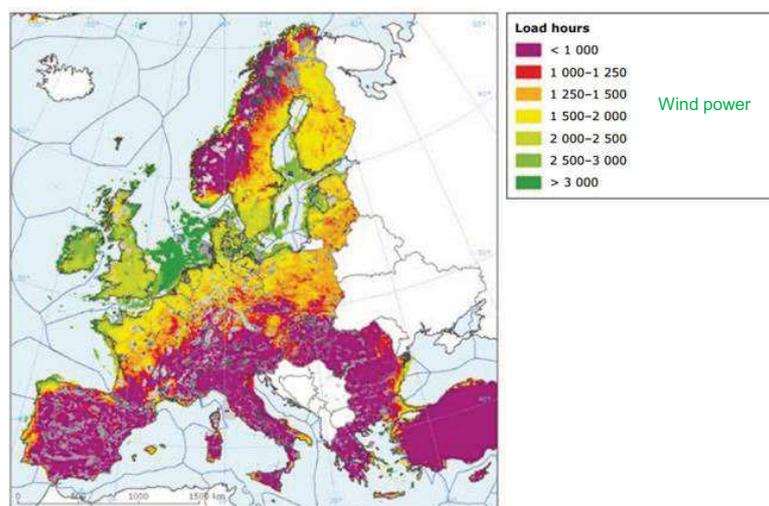


500-800 km

Cables: 100 km

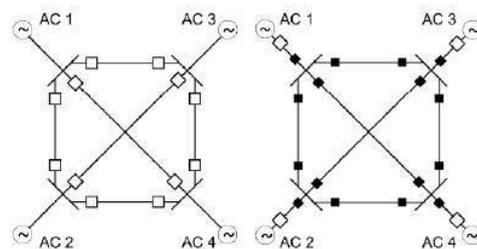
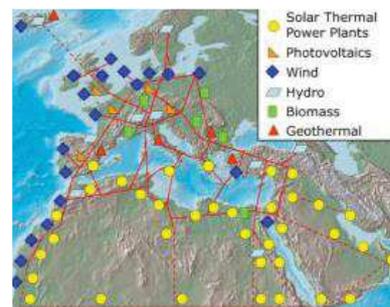


Potential Locations of HVDC Grids

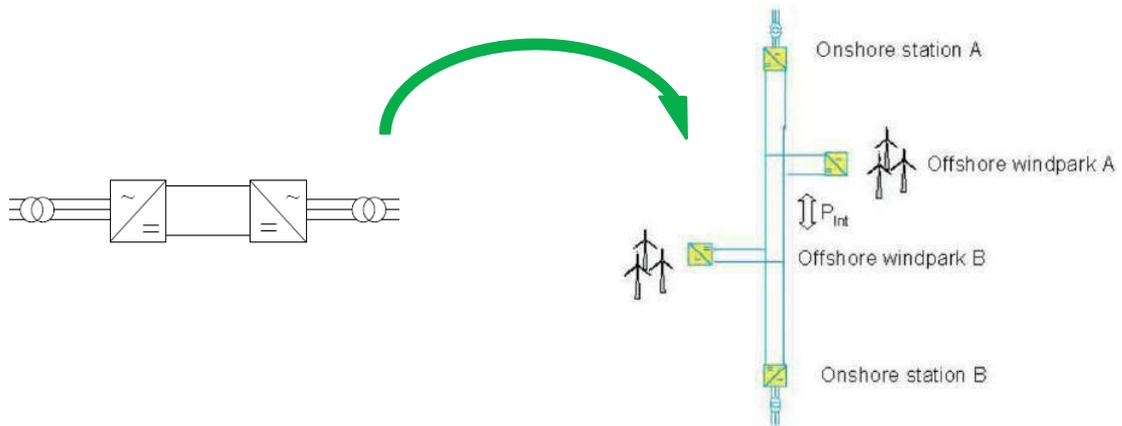


- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary

Why HVDC Grid instead of P2P?



P2P to HVDC Grid



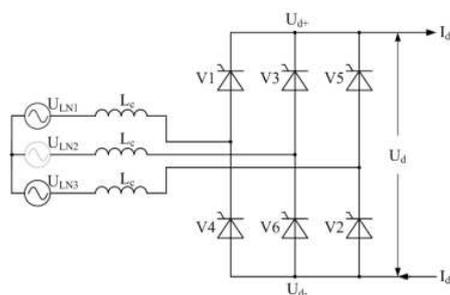
Ideal HVDC Grid

- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary

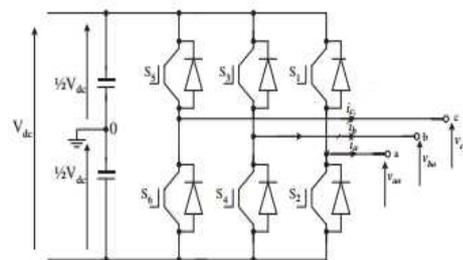
HVDC Converters

thyristors

CSC) based on



VSC) based on
 insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)

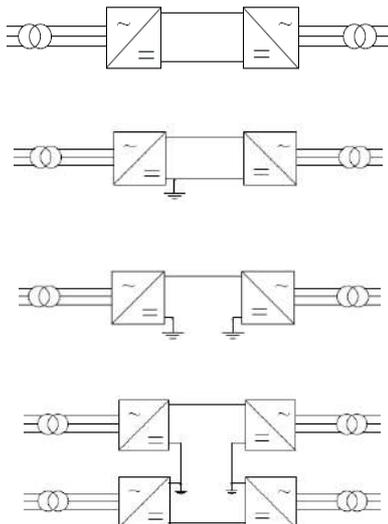


CSC or VSC ?

- Converter selection depends on the transmission needs of each project.
- However **VSC** offers greater flexibility and controllability.

	CSC	VSC
Reactive/active power	Consumes reactive power	Control over active and reactive power
Losses	≈0.7%	≈1.6%
Max. ower rating	6400 MW	800 MW
Power flow reversal	Change of pole voltage	Adjust PWM sequence
DC side inductors	Large	Small
DC side capacitors	Small	Large
DC short-circuit current rate of rise	Small and controllable	Large

Topologies of HVDC Terminals



Fault Probability of HVDC Grids

Overhead lines

- monopolar fault probability = **0.4 faults/100 km** a year (10% permanent damage)
- permanent bipolar faults = **0.003 faults/100 km** a year.

Submarine cables

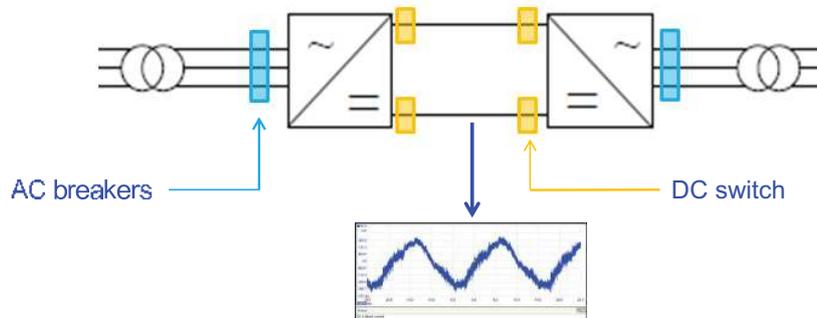
- Average fault incidence = **2.5×10^{-4} faults/100km** a year.
- Main danger comes from anchors and fishing activities.



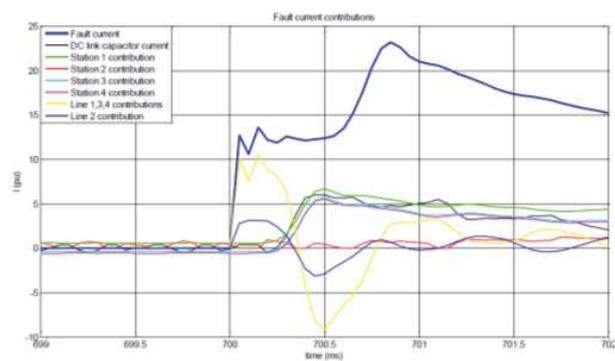
- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary



From P2P Protection to HVDC Grid Protection



Fault Detection in HVDC Grids



Inter-terminal Communication in HVDC Grids

Fault Current Reduction in HVDC Grids



Fault Current Detection in HVDC Grids

Overcurrent protection

- Designed to protect converters
- Based on the IGBT's max. current rating
- IGBTs are blocked after current overpasses selected threshold



Fault Current Detection in HVDC Grids

Overcurrent protection

- Designed to protect converters
- Based on the IGBT's max. current rating
- IGBTs are blocked after current overpasses selected threshold

Current direction detection

- Converters feed the fault as rectifiers
- Currents at the line ends have opposite directions.
- Potential DC CBs are triggered
- Communication between line ends required



Fault Current Detection in HVDC Grids

Overcurrent protection	Current direction detection	Current derivative detection
<ul style="list-style-type: none">• Designed to protect converters• Based on the IGBT's max. current rating• IGBTs are blocked after current overpasses selected threshold	<ul style="list-style-type: none">• Converters feed the fault as rectifiers• Currents at the line ends have opposite directions.• Potential DC CBs are triggered• Communication between line ends required	<ul style="list-style-type: none">• Derivative of current is higher in the faulty line.• Line isolation occurs after the limit derivative is reached.• Secondary oscillations must be considered• High sampling rate required



HVDC Circuit Breaker

Main challenges

- Lack of natural zero crossing
- Fast response (5 ms)
- Artificial zero current generation
- High energy dissipation and fast activation
- Voltage response handling



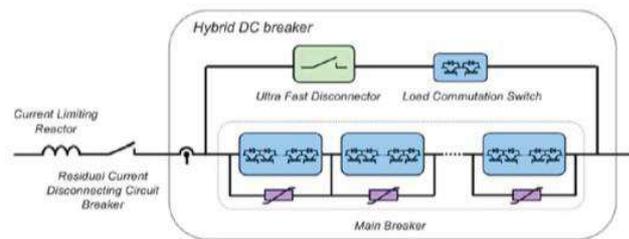
HVDC Circuit Breaker

Main challenges

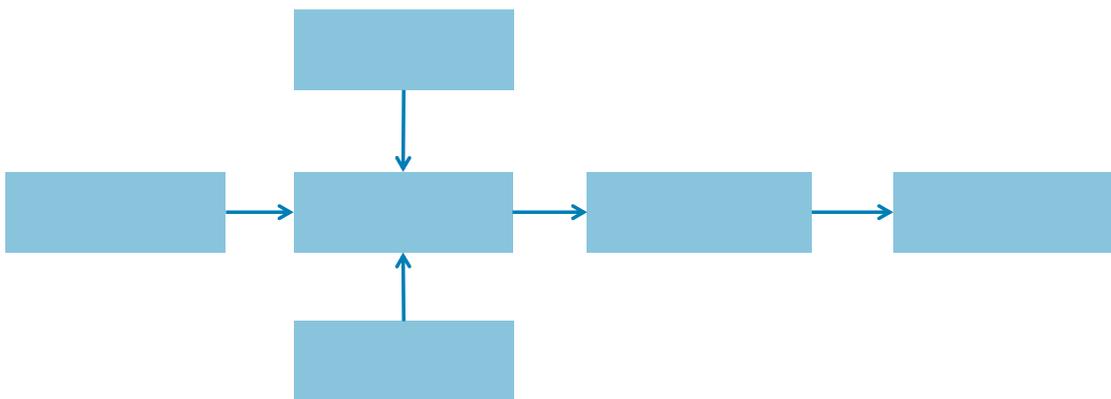
- Lack of natural zero crossing
- Fast response (5 ms)
- Artificial zero current generation
- High energy dissipation and fast activation
- Voltage response handling

Types of HVDC breakers

- Mechanical
- Semiconductor-based
- Hybrid



Open Grid Approach in HVDC Grids



Open Grid Approach in HVDC Grids



- Motivation
- Migration from P2P to Grid
- Operation of HVDC Grid Technology
- HVDC Grid Protection Schemes and Challenges
- Summary



Summary

Challenges

- Low DC line impedance and fast increase of current
- Communication delays
- No steady-state detection algorithm
- No natural zero crossing for line faults
- High sampling rates required
- Complex reflection analysis
- Construction of a cost effective CB
- Standardization of technology and methods



Technische
Universität
Braunschweig



Summary

Tools and possible solutions

- Testing and improvement of modular multilevel converters
- Ultra-fast CB design
- Combined methods and attempts for fault location
- Combination of open grid approach with inter-terminal communication
- Grid control design oriented to lower CB's duties
- Research on wide-bandgap materials (SiC, GaN and diamond)



Technische
Universität
Braunschweig



References



Schalten in höheren Netzspannungsebenen

Zhe Wang, Elenia, TU-Braunschweig, wangzhe900115@gmail.com

Kurzfassung

In diesem Seminar werden Leistungsschalter (Ölschalter, SF6-Schalter, Vakuumschalter) in höheren Netzspannungsebenen thematisiert. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Vorteilen und Nachteilen, sowie den Funktionen der verschiedenen Leistungsschalter. Im Hauptteil des Seminars wird der Schaltvorgang und die Wirkungsweise, wie zum Beispiel der Löschvorgang der Schalter thematisiert.

Abstract

The theme of this seminar is circuit breakers (oil circuit breaker, SF6 circuit breaker, vacuum circuit breaker) in high voltage networks. This report is mainly about advantages, disadvantages and function of different high voltage circuit breakers. The main part of the seminar is the switching process and the principle of arc extinction.

1 Einleitung

In höheren Netzspannungsebenen spielen Leistungsschalter eine wichtige Rolle. Leistungsschalter sind spezielle Schalter, die für hohe Ströme und hohe Spannungen ausgelegt sind. Sie können nicht nur Betriebsströme und geringe Überlastströme schalten, sondern im Fehlerfall auch hohe Überlastströme über eine kurze Zeit halten und sicher ausschalten.

Heutzutage werden die meisten Hochspannungskomponenten mit Schwefelhexafluorid (SF6) -Isolierung betrieben. Aber gleichzeitig existieren einige andere Schaltmedien, z.B. Öl, Vakuum.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der Leistungsschalter notwendigen Grundlagen erarbeitet. Ölschalter werden in Kesselbauweise aufgebaut. In dieser Bauweise sind große Mengen an Öl zur Isolierung notwendig [2]. Druckgasschalter benutzen zur Lichtbogenlöschung der Schaltstrecke SF6, mit der der Lichtbogen schnell zersetzt wird. Vakuumschalter sind typischerweise klein und haben geringes Gewicht. Das ermöglicht den Einbau direkt an der Einsatzstelle. Da in dem Kontaktbereich kein Gas vorhanden ist, kommt es bei der Kontaktöffnung zu einem kleinen Metaldampfbogen, welcher aus verdampftem Oberflächenmaterial der Kontakte gespeist wird. Wegen der teilweise diffusen Ionen durch die Druckabweichung zwischen dem Metaldampfbogen und dem Vakuum wird der Metaldampfbogen gelöscht [1].

3 Hauptteil

3.1 Ölschalter

Es gibt zwei Typen bei Ölschaltern, den Ölkesselschalter und den ölarmen Schalter. Bei Ölkesselschaltern dient das Öl als Schaltmedium und zur Isolierung. Aber beim Ölarmerschalter dient das Öl nur als Schaltermedium. Das ist der Grund, warum der Schalter Ölarmerschalter heißt. In dieser Arbeit wird Ölkesselschalter hauptsächlich behandelt.

Im **Bild 1** wird die Struktur vom Ölschalter dargestellt.

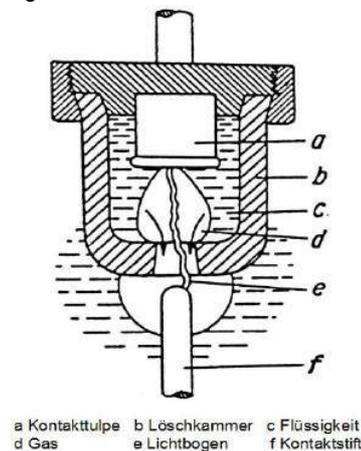


Bild 1 Ölkesselschalter [2]

Der Ölschalter besteht vor allem aus einer Kontakttulpe, einer Löschkammer und einem Kontaktstift. Wenn die stromdurchflossenen Kontakte geöffnet werden, entsteht der Lichtbogen. Die Temperatur von dem Lichtbogen ist sehr hoch.

Das führt zur Verdampfung des Öles. Dadurch kommt es zur Entstehung von einer Gasblase. Das meiste Gas darin ist Hydrogen. Hydrogen hat eine gute Wärmeleitfähigkeit. Die Gasblase verdrängt das Öl. Der Spiegel von dem Öl muss steigen. Aufgrund der Grenze vom Ölkessel wird die Ausdehnung der Gasblase begrenzt. Der Druck von der Gasblase bleibt zwischen 0.5 und 1 Megapascal. Durch die Abweichung von Druck und Temperatur verkühlt der Lichtbogen. Mit dem zunehmenden Abstand zwischen beiden Kontakten wird der Lichtbogen gleichzeitig verlängert. Beim nächsten Stromnulldurchgang verlöscht der Lichtbogen. Das ist die Wirkungsweise von Ölschaltern.

Der Ölschalter hat eine einfache Struktur, einen geringen Platzbedarf und einen geringen Preis. Aber beim Ölkesselschalter ist eine große Mengen an Öl notwendig. Das ist der Nachteil vom Ölschalter. Außerdem kann das Öl zu einem Brand führen, wenn das Öl austritt.

3.2 SF6-Schalter

Bei diesem Schalter ist Schwefelhexafluorid(SF6)-Gas das Schaltmedium. Zum Vergleich mit Ölschaltern verwenden SF6-Schalter eine Düse. Wenn die Kontakte geöffnet werden, wird durch die Düse SF6-Gas freigesetzt. Das Gas strömt mit nahezu Schallgeschwindigkeit.

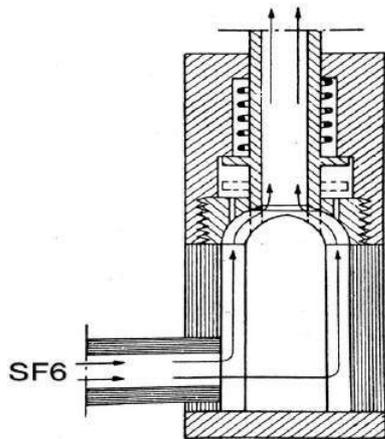


Bild 2 SF6-Schalter

Als Inertgas hat SF6 zwei gute Eigenschaften. Zuerst hat dieses Gas eine hohe elektrische Festigkeit. Die Elektronen aus dem Lichtbogen werden durch die Absorption von SF6-Gas und dem zersetzten Halogen Molekül stark reduziert. Das führt zur Verringerung der Bewegung von Ladungsträgern. Als Folge verschwindet die Ladungsleitfähigkeit vom Lichtbogen schnell. Die zweite Eigenschaft ist die gute Wärmeleitfähigkeit. Wenn der Lichtbogen brennt, hat die Mitte des Lichtbogens einen hohen Temperaturgradient.

Durch die ausreichende thermische Zersetzung verkühlt der Lichtbogen schnell. Es kommt zur Verlöschung vom Lichtbogen.

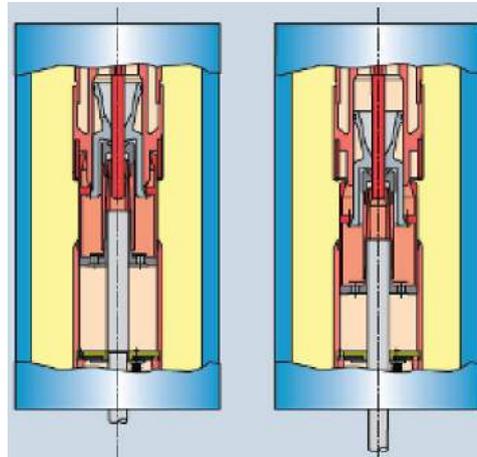


Bild 3 Vorgang von Ausschalten

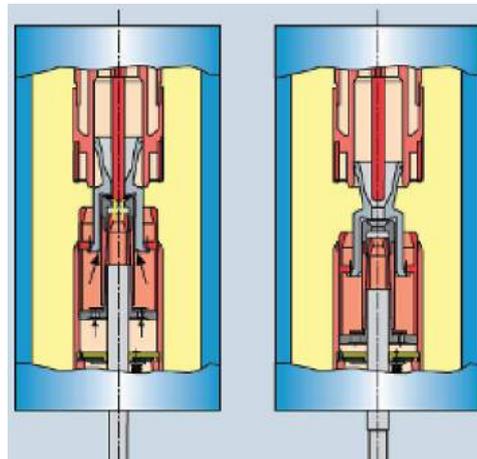


Bild 4 Vorgang von Ausschalten

Bild 3 und **Bild 4** zeigen den mechanischen Prozess des Ausschalten vom SF6-Schalter

Die andere Aufgabe bei diesem Schalter ist die Spannungsverfestigung der Schaltstrecke. Diese führt nach dem Lichtbogenabritt zwischen dem geöffneten Kontakten zu vorübergehend ladungsträgerfreier Luft mit hohem Druck und hoher Durchschlagfestigkeit [2].

SF6-Schalter haben auch einen geringen Platzbedarf. Er ist gut für den Dauerbetrieb und sicherer als der Ölschalter. Der Nachteil von SF6-Schaltern ist eine aufwendige Herstellung. SF6-Gas ist ein treibhausschädigendes Gas.

3.3 Vakuumschalter

Bei diesem Schalter ist Vakuum das Schaltmedium.

Die im **Bild 5** aufgeführten Bauteile des Vakuumschalters sind der Anschlussbolzen, der feste Kontakt, der Isolator, die Kontaktstücke, die Schaltkammer, der Metall-Faltenbalg, der elektrische Anschluss und der mechanische Anschluss für den Antrieb.

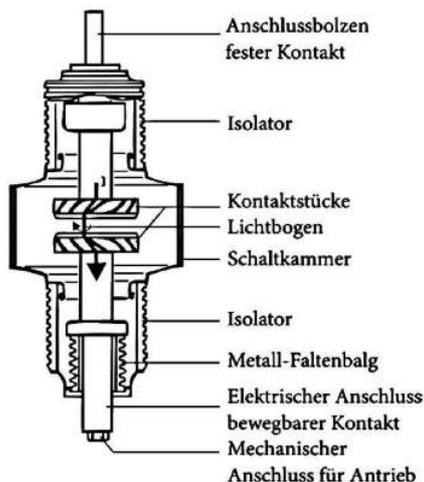


Bild 5 Vakuumschalter [1]

Der Isolator aus Keramik wird mit metallischen Endflanschen gefestigt. Kontaktwerkstoffe sind typischerweise Chromium und Kupfer. Beim Löschen des Lichtbogens gibt es zwei Hauptwirkungsweisen. Die erste ist durch die Diffusion des Metalldampfbogens. Wenn beide Kontakte geöffnet werden, kommt es zur Entstehung von einem Metalldampfbogen. Die hohe Temperatur des Metalldampfbogens führt zu der Entstehung des Metalldampfes. Aufgrund des Vakuumzustandes kommt es zu der Diffusion der Ionen durch die Druckabweichung zwischen Metalldampfbogen und Vakuum. Dann verlöscht der Metalldampfbogen.

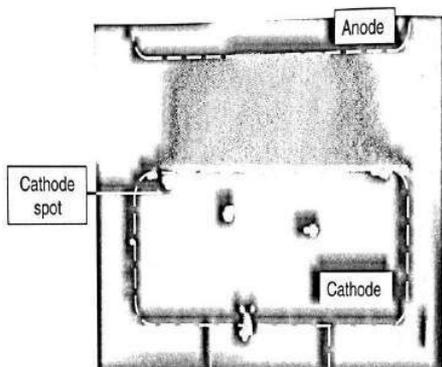


Bild 6 Diffusion des Metalldampfbogens [1]

Das **Bild 7** ist eine Darstellung von dem Prozess. Die zweite Wirkungsweise ist durch ein Magnetfeld.

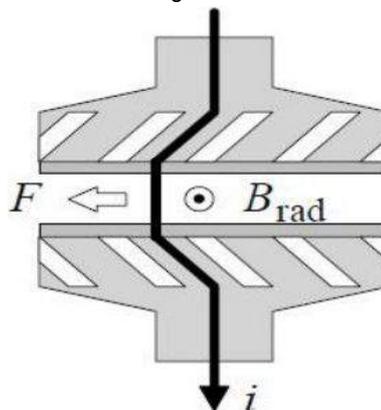


Bild 7 Erzeugung von Magnetfeld [3]

Im **Bild 7** ist ein Radialmagnetfeld-Kontakt dargestellt. Bei dieser Kontaktform führt der Strom durch die elektromagnetische Induktion zu einem Magnetfeld. Die Richtung vom Magnetfeld ist senkrecht auf die Richtung des Stromes. Das führt zu einer Lorentz-Kraft.

RMF-Kontakt

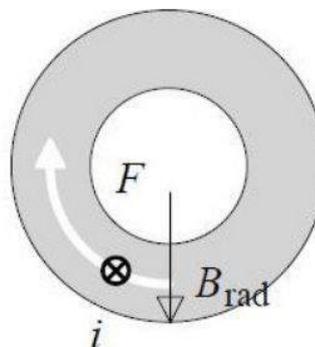


Bild 7 Erzeugung der Lorentz-Kraft [3]

Dadurch kommt es zu kreisförmigen Bewegung des Metalldampfbogens. Außerdem führt das auch zur Verlängerung des Metalldampfbogens. Dadurch wird der Metalldampfbogen gekühlt und gelöscht. Die Nennwerte der Stehstoßspannung von 125 kV wird bei einem Kontaktspace von nur 3 Millimetern gehalten [1]. Vakuumschalter sind gut für den Dauerbetrieb und umweltfreundlich. Er hat eine hohe Sicherheit und einen geringen Platzbedarf. Aber beim Ausschalten

wird eine Überspannung erzeugt. Außerdem ist der Vakuumschalter aufwendig.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die konventionellen Leistungsschalter vorgestellt. Die Eigenschaften und Applikationen der verschiedenen Leistungsschalter sind unterschiedlich. Ölschalter werden in der Niederspannung-, Mittelspannung- und Hochspannungsebene eingesetzt. SF6-Schalter werden normalerweise in der Mittelspannung- und Hochspannungsebene eingesetzt. Vakuumschalter werden nur in der Niederspannung- und Mittelspannungsebene eingesetzt. Die weltweit gesammelten Erfahrungen in der Hochspannungstechnik haben reichlich Belege dafür geliefert, dass keine der drei Techniken der anderen überlegen ist, sondern dass sie sich aus der Sicht der Anwendung gegenseitig ergänzen.

5 Literatur

- [1] H.-J. Lippmann, Schalten im Vakuum, Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2003.
- [2] H.Schulze, Technik der Wechselstrom Hochspannungsschalter, Berlin: VEB VERLAG TECHNIK, 1961.
- [3] A. Küchler, Hochspannungstechnik, Heidelberg:Springer, 2009.



Schalten in höheren Netzspannungsebenen

Zhe Wang, 03.02.2016

Gliederung

1. Motivation
2. Ölschalter
 - Aufbau
 - Wirkungsweise
 - Vorteile und Nachteile
3. SF6-Schalter
 - Aufbau
 - Wirkungsweise
 - Vorgang
 - Vorteile und Nachteile
4. Vakuumschalter
 - Aufbau
 - Wirkungsweise
 - Vorteile und Nachteile
5. Zusammenfassung
6. Literaturverzeichnis

Motivation

- Aufgabe von Leistungsschaltern
 - Zum Schalten von Betriebsströmen
 - Zum Schalten von Überlastströmen bei Fehlern
- Vergleich von Leistungsschaltern, Trennschaltern und Lastschaltern



<http://www.bayern-online.com>
30.01.2016

Leistungsschalter



<http://www.raustoc.ch/>
30.01.2016

Trennschalter



<http://www.directindustry.de/>
30.01.2016

Lastschalter

Ölschalter

- Arten von Ölschalter (Ölkessel-Schalter und Ölarmers-Schalter)
- Unterschied zwischen beiden Ölschaltern:



<http://cnltdq.net/>
30.01.2016

Ölkessel-Schalter



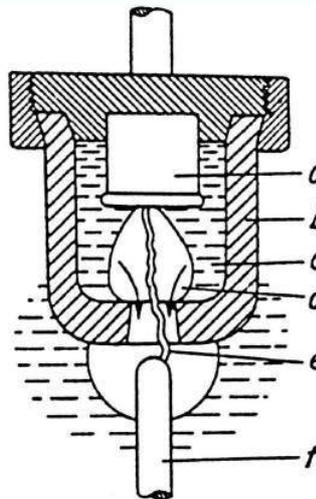
<http://www.syxtykg.com/>
30.01.2016

Ölarmers-Schalter

Ölschalter(Ölkessel-Schalter)

Aufbau und Wirkungsweise

- Öl als Schalt- und Isoliermedium
- Verdampfung des Öles
- Entstehung einer Gasblase
- Steigung des Ölpegels
- Löschung des Lichtbogens



H. Schulze, Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter

a Kontakttulpe b Löschkammer c Flüssigkeit
d Gas e Lichtbogen f Kontaktstift

Ölschalter

- **Vorteile**
 - einfache Struktur
 - geringer Platzbedarf
 - geringer Preis
- **Nachteile**
 - große Mengen an Öl notwendig
 - Brandgefahr



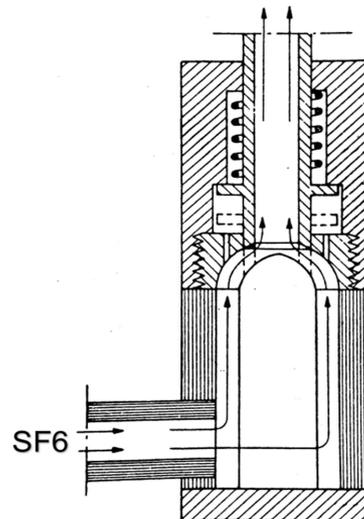
<https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de>
30.01.2016

Ölkessel-Schalter

SF6-Schalter

Aufbau

- Schwefelhexafluorid(SF6) als Schaltmedium
- Verwendung einer Düse
- das Gas strömt mit nahezu Schallgeschwindigkeit



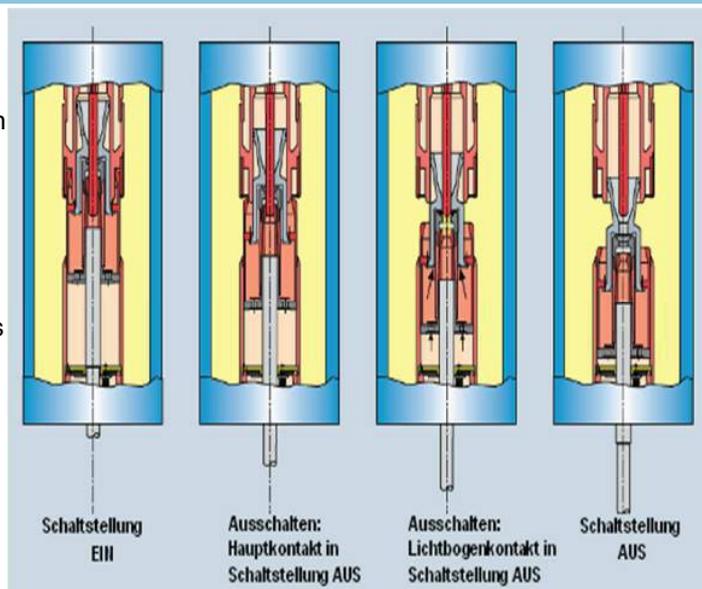
H. Schulze, Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter

Prinzip der Schaltstrecke eines SF6-Schalters

SF6-Schalter

Vorgang des Ausschalten

- Bewegung des beweglichen Kontaktes
- Zusammenpressen des Gases
- Entstehen des Lichtbogens
- Freisetzen des Gases
- Löschen des Lichtbogens

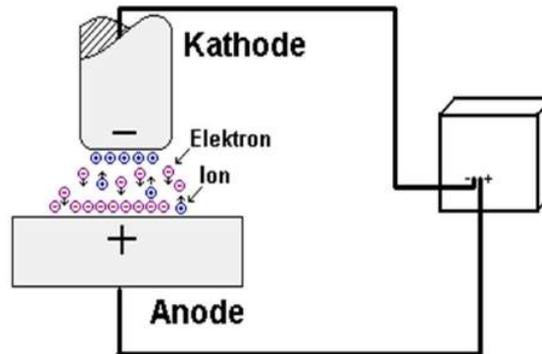


<http://www.energy.siemens.com>
30.01.2016

SF6-Schalter

Wirkungsweise

- zur Lichtbogenlöschung
 - hohe elektrische Festigkeit
 - große Wärmeleitfähigkeit
- zur Spannungsverfestigung
 - ladungsträgerfreie Luft



<http://www.der-wirtschaftsingenieur.de>
30.01.2016

Physikalischer Prozess

SF6-Schalter

- **Vorteile**
 - geringer Platzbedarf
 - gut für Dauerbetrieb
 - Sicherer als der Öl Schalter
- **Nachteile**
 - Herstellung aufwendig
 - SF6 als Treibhausschädigendes Gas



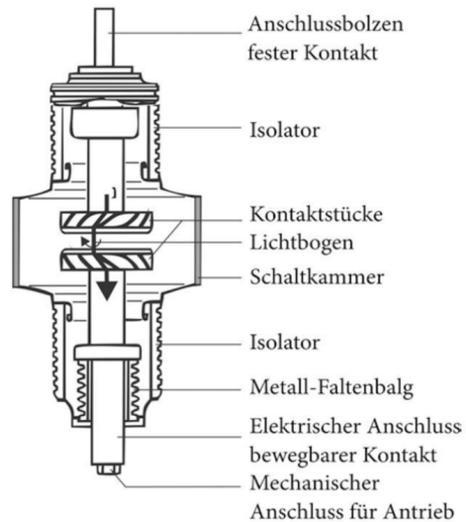
<http://www.kw-goeschenen.ch/>
30.01.2016

SF6-Schalter

Vakuumschalter

Aufbau

- Vakuum als Schaltmedium
- ein Keramikisolator mit metallischen Endflanschen
- Kontaktwerkstoff CrCu

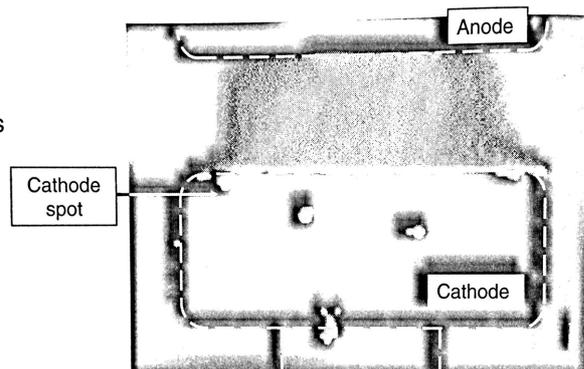


R. Marenbach, D. Nelles, C. Tuttas, Elektrische Energietechnik

Vakuumschalter

Wirkungsweise

- Trennung der beiden Kontakte
- Entstehung des Metalldampfbogens
- Erzeugung des Metalldampfs
- Diffusion der Ionen durch die Druckabweichung zwischen Metalldampfbogen und Vakuum
- Löschung des Metalldampfbogens



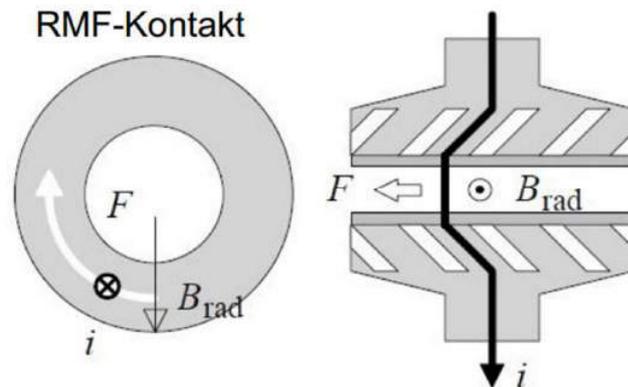
Paul G. Slade, The Vacuum Interrupter

Diffusion des Metalldampfbogens

Vakuumschalter

Wirkungsweise

- Erzeugung des Magnetfeldes
- Erzeugung einer Kraft
- Kreisförmige Bewegung des Lichtbogens
- Löschung des Lichtbogens

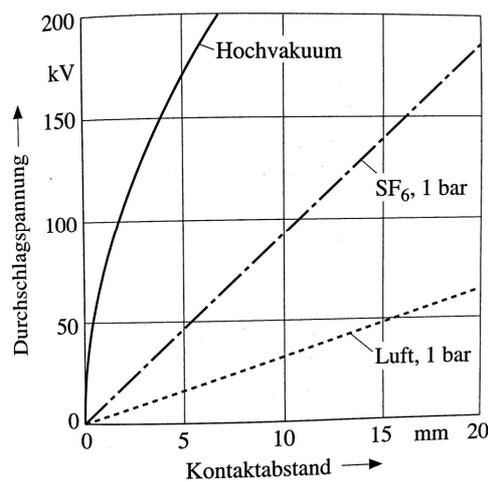


A. Küchler, Hochspannungstechnik

Vakuumschalter

Eigenschaften

- Vergleich mit SF₆ und Luft als Schaltmedium
- hohe dielektrische Festigkeit
- Die Nennwerte der Stehstoßspannung von 125 kV wird bei einem Kontaktspace von nur 3 Millimetern gehalten



Hans Joachim Lippmann, Schalten im Vakuum

Vakuumschalter

- **Vorteile**
 - gut für Dauerbetrieb
 - hohe Sicherheit
 - geringer Platzbedarf
 - Umweltfreundlich

- **Nachteile**
 - Erzeugung von Überspannungen
 - Aufwendig



<http://www.directindustry.de>
30.01.2016

Vakuumschalter

Zusammenfassung

- Vorteile und Nachteile von verschiedenen Leistungsschaltern

- Aufbau und Wirkungsweise von verschiedenen Leistungsschaltern

- Applikation der Leistungsschaltern
 - Ölschalter in NS- , MS- und HS-Ebene
 - SF6-Schalter in MS- und HS-Ebene
 - Vakuumschalter in NS- und MS-Ebene

Fragen?

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

Literaturverzeichnis

- H. Schulze, Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter
- Hans Joachim Lippmann, Schalten im Vakuum
- R. Marenbach, D. Nelles, C. Tuttas, Elektrische Energietechnik
- Paul G. Slade, The Vacuum Interrupter
- A. Küchler, Hochspannungstechnik

Isolationsprüfung in der Energietechnik

Verification of cable insulation in energy technics

B.Sc. Yannick Schubert, Elenia, Braunschweig, y.schubert@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde die Isolierstoffprüfung in der Energietechnik anhand des Beispiels eines Ölkabels mit einer Isolierung aus Papier oder polypropylenbeschichtetem Papier und Metallmantel und Garnituren für Wechselspannungen bis einschließlich 400 kV analysiert. Die Prüfungen an dem Kabel wurden dabei anhand der Anweisungen und Vorgaben aus DIN VDE 0276-633 analysiert und vorgestellt.

Zunächst wurde dazu die Notwendigkeit von Isolierstoffprüfungen in der Hochspannungstechnik erläutert und anschließend auf die Isolationskoordination nach DIN VDE 0111 angewandt. Darauf aufbauend wurde eine Erläuterung der Prüfung an o.g. Beispiel vorgenommen. Die Prüfungen wurden in Form von Stückprüfung, Auswahlprüfung sowie Typprüfung analysiert.

Abstract

This presentation is about verification of cable insulation in energy technics by the hand of an oil-filled cable with insulation made of paper or polypropylene-surfaced paper and metal sheat for alternating currents up to 400 kV.

The verification of the cables is based on DIN VDE 0276-633.

First the reason of verifications of insulations in high voltage cables was presented and applied on insulation coordination in DIN VDE 0111. The verifications were presented for routine test, qualifying examination and approval.

1 Einleitung

In der heutigen Zeit wird die Versorgung mit erneuerbaren Energien ein Thema mit immer zentralerer Bedeutung. In Folge der Energiewende wird auch die Verbindung von Nord- und Süddeutschland immer wichtiger. Aufgrund politischer Bewegungen ist nun eine lange Kabeltrasse in Bayern in der Diskussion, die mit hohen Spannungen betrieben werden soll.

In einem Regierungsbeschluss aus dem Dezember 2015 wurde darüber hinaus festgelegt, dass eine unterirdische Variante der Nord-/Südverbindung bevorzugt werden soll. Daneben besteht zusätzlich die Überlegung die Verbindung als HGÜ-Verbindung (Hochspannungs-Gleichstromübertragung) auszuführen.

Bei einem derart großen Projekt dieser Ausführung bestehen meist noch keine praktischen Erfahrungswerte. Daher treibt das Projekt die Frage nach der Isolation und der dazugehörigen Isolationsprüfung von Kabeln bei sehr hohen Feldstärken voran, mit der sich diese Arbeit beschäftigt.

Zentrale Motivation der Arbeit ist also zu ermitteln, wie die Sicherstellung der Dielektrischen Festigkeit der Energieleiter erfolgt, um sicherzustellen, dass ein unterbrechungsfreier Betrieb des Transportnetzes möglich ist.

2 Theoretische Grundlagen

Beim Betrieb von Geräten in der Hochspannungstechnik wird mit hohen Spannungen und somit hohen elektrischen Feldstärken gearbeitet. Diese elektrischen Feldstärken müssen beherrscht werden, um einen reibungslosen Betrieb gewährleisten zu können.

In dieser Arbeit wird der Umgang mit Hochspannungskabeln zu Grunde gelegt.

Bei diesen Betriebsmitteln kommt es vor allem darauf an, dass die Isolation der einzelnen Leiter den Feldstärken standhalten kann und es nicht zu einem Versagen der Isolation mit anschließendem Kurzschluss kommt.

Neben direkten galvanischen Kopplungen gibt es auch indirekte kapazitive und induktive Kopplungen, welche ebenfalls Probleme mit der Isolation erzeugen können.

Kenntnisse über die Grundlagen elektromagnetischer Felder sind Voraussetzung zum Verständnis der Notwendigkeit von Isolationsprüfungen zur Vermeidung von Betriebsstörungen.

Auch Kenntnisse über den Aufbau des deutschen Hochspannungsnetzes sowie über Hintergründe der politischen Diskussion rund um die neuen Energietrassen sind notwendig zur Einordnung der Problemstellung, dass die Bundesrepublik Deutschland nun in Erwägung zieht eine Hochspannungskabeltrasse zu errichten.

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Deutschland befindet sich derzeit in einer Energiewende. Wesentlicher Bestandteil dieser ist der Ausbau erneuerbarer Energieerzeuger, insbesondere Photovoltaik und Windenergie. Speziell im Norden der Republik ist das Potential für Windenergie sehr groß, weshalb dort große Energiemengen erzeugt werden. Die großen Verbrauchszentren befinden sich dagegen im Süden der Republik. Aufgrund dieser Diskrepanz wurde von der Regierung im Bundesbedarfsplan festgehalten, dass neue Stromtrassen beide Landesteile zukünftig verbinden sollen. Speziell die geplante Verbindung *Südlink*, von Wilster nach Grafenrheinfeld, stellt die Durchführung

aufgrund diverser Bürgerinitiativen und –Protesten gegen große Strommasten vor größere Probleme.

Um die verschiedenen Interessen vereinen zu können wurde von der Regierung beschlossen, eine unterirdische Verbindung zu bevorzugen. [www.deutschlandfunk.de, Abruf 20.1.16]

Aktuell ist daher eine HGÜ-Kabelverbindung für *Südlink* im Gespräch.

Die großen Probleme für die Kabel und deren Isolation liegen dabei im Auftreten von transienten und zeitweiligen Überspannungen.

Es werden drei grundsätzliche Arten von Überspannungen unterschieden:

- Blitzstoßüberspannung
- Schaltstoßüberspannung
- Wechsellspannungsüberspannung

Die Blitzstoßüberspannung ist durch eine schnelle Anstiegs- sowie eine kurze Rückenhalbwertszeit charakterisiert. ($T_{Anstieg} \approx 1,2 \mu s$, $T_{Rückenhw} \approx 50 \mu s$)

Einen ähnlichen Aufbau hat die Schaltstoßüberspannung jedoch mit längeren Zeiten.

($T_{Anstieg} \approx 250 \mu s$, $T_{Rückenhw} \approx 2500 \mu s$)

Bei der Wechsellspannungsüberspannung liegt eine zeitweilige Überschreitung der angegebenen Betriebsspannung vor. [5]

Um diese Überspannungen angemessen beherrschen zu können gibt es die Isolationskoordination. Grundsatz dieser ist es der angenommenen Betriebsspannung eine Reserve zuzufügen, um eine wirtschaftliche und technische ausreichend hohe elektrische Festigkeit zu erreichen. [5]

Das Vorgehen dabei ist in der DIN VDE 0111 Teil 1 festgelegt, wie bei der Ermittlung der Reserve vorgegangen werden muss. [4]

Zunächst muss eine Netzanalyse vorgenommen werden, bei der die zu erwartenden Spannungen und Überspannungen berücksichtigt werden. Dabei wird die repräsentative Spannung U_{rp} festgelegt. [4]

Anschließend wird eine akzeptable Anzahl an Fehlern, die gerade noch toleriert werden können, festgelegt. Dabei werden technische sowie wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt, da nur unter sehr erheblichem Aufwand auch die höchsten Überspannungen ohne Durchschlag überstanden werden können. Dabei ergibt sich die Koordinationsstehtspannung U_{cw} . [4]

Um die atmosphärischen Schwankungen zu berücksichtigen, wird noch ein weiterer Koordinationsfaktor einbezogen und ergibt die erforderliche Stehspannung U_{rw} . [4]

Diese erforderliche Stehspannung wird dann mit Tabellenwerten aus der DIN VDE Norm verglichen und ergibt die Bemessungsspannung U_w . [4]

Um dem Endverbraucher die Möglichkeit zu geben Geräte auf ihre Betriebssicherheit zu überprüfen, können Prüfzertifikate herangezogen werden.

Die dafür üblicherweise zur Verfügung stehenden sind dabei das CE (Communauté Européenne), das GS

(Geprüfte Sicherheit) sowie das VDE (Verbund der Elektrotechnik) Zertifikat.

Das CE Zeichen ist dabei ein vom Hersteller angebrachtes Siegel, was die Berücksichtigung europäischer Richtlinien bestätigt. Es gibt in der Regel keine Prüfinstanz dafür, weshalb das Zeichen in Bezug auf Betriebssicherheit relativ unbedeutend ist.

Das zweite verbreitete Zeichen ist das GS-Siegel. Es bestätigt die Einhaltung des deutschen Produktsicherheitsgesetzes und wird von zertifizierten Prüforganisationen vergeben. Es gibt somit schon etwas mehr Sicherheit als das CE-Zeichen, basiert aber dennoch auf den etwas lockeren Standards des nationalen Rechts.

Anders ist das VDE-Zeichen. Es wird durch vom Geräteanbieter bezahlte Prüfungen an anerkannten Institutionen nach intensiven Tests der Produkte ausgestellt. Dabei werden die Produkte auf die Einhaltung der strengen Normen des VDEs getestet. Das Siegel bestätigt dem Produkt somit ein hohes Maß an Sicherheit. Zertifizierte Prüfinstitutionen sind dabei auf nationaler Ebene Organisationen, die durch die deutsche Akkreditierungsstelle zertifiziert werden. Diese Akkreditierung entspricht dabei der rechtlichen Anerkennung durch eine offiziell zulässige Instanz.

3.1 Prüfungen

Grundlage dieser Arbeit ist die DIN VDE 0276-633. Dabei geht es speziell um die Prüfungen an Ölkabeln.

Dabei sind diverse Bereiche an den Kabeln zu überprüfen, wie zum Beispiel Biegefestigkeit, Zugfestigkeit und diverser elektrischer Größen. [4]

Um Prüfungen offiziell durchführen zu können sind auch die Prüfbedingungen in der Norm festgehalten. [2]

Dabei ist festgeschrieben, dass die Frequenz des Stromes dabei zwischen 49 Hz und 61 Hz liegt. [2]

Die Prüfspannung muss bis auf eine Abweichung von 5% annähernd sinusförmig sein und die Prüfstoßspannung muss eine Wellenform nach HD (Harmonisierungsdokument – aus den DIN VDE Normen) 48 aufweisen. [2]

Darüber hinaus muss eine Umgebungstemperatur von 5-35 °C vorliegen. [2]

3.1.1 Prüfungsarten

Bei den Prüfungen nach DIN VDE werden vier verschiedene Formen von Prüfung unterschieden: [2]

- Typprüfung
- Stückprüfung
- Auswahlprüfung
- Prüfung an Kabelgarnituren

Die Typprüfung ist diejenige, welche als erste vor Markteintritt stattfindet und in der Regel schon mit dem Prototyp eines neuen oder geänderten Produkts durchgeführt wird. Sie soll die Einhaltung der Anforderungen an den grundsätzlichen Aufbau eines Produkts beweisen. [2]

Sie muss dabei nicht wiederholt werden, wenn bereits ein ähnliches Produkt die Anforderungen erfüllt. [2]

Bestandteil der Prüfung sind die Messung des $\tan(\delta)$, bei der die Messwerte mit Tabellenwerten aus HD 383

verglichen werden müssen, sowie eine Dauerwechselsspannungsprüfung. Dabei darf eine Kabellänge unter erhöhter Betriebsspannung innerhalb von 24 Stunden keinen Durchschlag aufweisen. Darüber hinaus ist noch eine Stoßspannungsprüfung notwendig. Dabei darf wieder kein Durchschlag auftreten, wenn 20 Stoßspannungen nach Norm auf das Kabel treffen. [2]

Die Stückprüfung wird in der Regel mit Produkten aus der frühen Serienfertigung durchgeführt. Dabei wird die Funktionstüchtigkeit des fertigen Kabels bestätigt. Das Kabel wird dabei in der vollen Länge betrachtet. [2]

Bestandteile der Prüfung sind die Prüfung des Gleichstromwiderstandes, der Kapazität, des $\tan(\delta)$ und des Korrosionsschutzes sowie Spannungsprüfungen. [2]

Der Gleichstromwiderstand darf nicht zu groß werden und muss genormten Standrads entsprechen. Diese sind in Tabellen des HD 383 niedergeschrieben für Kabel mit einem Querschnitt von weniger als 400 mm^2 bei dreiadrigen Kabeln und von weniger als 2000 mm^2 bei einadrigen Kabeln. [2]

Bei Betriebsfrequenz darf die Kapazitätsdifferenz nicht mehr als acht Prozent betragen.

Der $\tan(\delta)$ wird bei Betriebsspannung, sowie bei der doppelten Betriebsspannung ermittelt, wenn es sich um Kabel mit einer Betriebsspannung von weniger als 87 kV handelt und bei $1,67 U_0$, wenn es sich um Kabel mit einer Betriebsspannung von mehr als 87 kV handelt. Die ermittelten Werte werden mit Tabellenwerten aus der Norm abgeglichen. [2]

Die Spannungsprüfung sieht vor, dass bei einem Vielfachen der Betriebsspannung kein Durchschlag erfolgen darf. Der Spannungspegel wird dabei langsam auf den vorgeschriebenen Wert angehoben. Ist der Wert erreicht, wird er 15 Minuten gehalten. Während dieser Zeit darf kein Durchschlag erfolgen. Bei Betriebsspannungen bis 87 kV wird die Spannung auf $2 U_0$ und bei Betriebsspannungen von mehr als 87 kV wird die Spannung auf $1,67 U_0$ angehoben. Zusätzlich werden noch 10 kV auf die Spannung aufgeschlagen. [2]

Die Auswahlprüfung ist ähnlich der Stückprüfung, findet jedoch nicht an der vollen Kabellänge statt. Es wird dabei in regelmäßigen Abständen ein Teil des Kabels aus der Fertigung genommen und auf Funktionstüchtigkeit geprüft. Es wird zusätzlich eine Prüfung der mechanischen Faktoren vorgenommen. Teile dieser Prüfung sind die Wanddicke der Isolierung, die Biegefestigkeit sowie die Wanddicke des Metallmantels. [2]

Die dabei ermittelten Werte werden dabei mit den Tabellenwerten aus der Norm verglichen und als zulässig oder unzulässig eingestuft. [2]

Die Verringerung der Wanddicke des Metallmantels darf aufgrund von Dehnungen bei Bleimänteln nicht größer als 5% sein, bei glatten Aluminiummänteln nicht größer als 10% und bei gewellten Aluminiummänteln nicht größer als 15%. Zusätzlich wird bei allen Mänteln eine Toleranz von 0,1 mm gewährt. [2]

Nach der Biegeprüfung erfolgt eine anschließende Spannungsprüfung bei einem Vielfachen der Nennspannung. Bei Nennspannungen von weniger als 87 kV beträgt diese überhöhte Spannung $2 U_0 + 10\text{ kV}$ und bei Kabeln mit einer Nennspannung von mehr als 87 kV beträgt die Prüfspannung $1,67 U_0 + 10\text{ kV}$. [2]

Darüber hinaus erfolgt auch eine Sichtprüfung auf äußere Beschädigungen der Isolation. [2]

4 Kritische Würdigung

In dieser Arbeit wird die DIN VDE 0276-633 als Grundlage verwendet. Darin wird lediglich die Prüfung an *Ölkabeln mit einer Isolierung aus Papier oder polypropylenbeschichtetem Papier und Metallmantel und Garnituren für Wechselspannungen bis 400 kV* ($U_m = 420\text{ kV}$) normgerecht beschrieben. Daher bezieht sich diese Arbeit auf eine Isolierstoffprüfung, die an einem speziellen Produkt angewandt wird und nicht auf die Allgemeinheit. Es gibt daher sicherlich noch andere Arten und Ausführungen von Isolierstoffprüfungen.

Ziel der Arbeit ist, zu beleuchten welcher Umfang an Prüfungen hinter den Geräten der Elektrotechnik steckt. Dies wird in den Kontext zu der geplanten Nord-Südverbindung gesetzt um ein aktuelles Vorhaben betrachten zu können und eine Einschätzung des notwendigen Aufwandes der hinter so einem Projekt hinsichtlich der elektrischen Isolation besteht, zu ermöglichen. Da hier das Beispiel des Kabels gewählt wurde, es aber eine Vielzahl an weiterer elektrischer Systeme gibt, kann diese Arbeit nicht den Umfang der gesamten Isolationstechnik wiedergeben, sondern nur einen Eindruck vermitteln..

5 Zusammenfassung/Fazit

In dieser Arbeit wird gezeigt, dass Isolierstoffprüfungen zwingend notwendig sind, um den Nachweis über die Betriebssicherheit elektrischer Anlagen zu liefern.

Für den qualifizierten Nachweis erfolgen die Prüfungen anhand von festgelegten Standards anhand von Normen auf nationaler Ebene nach DIN VDE.

6 Literatur

- [1] A. Küchler, Hochspannungstechnik, Schweinfurth: Springer, 2009.
- [2] DKE, DIN VDE 0276-633, Berlin: VDE-Verlag, 1999
- [3] DKE, DIN VDE 0276-605, Berlin: VDE-Verlag, 2009
- [4] Kämpfer, Kopatsch, Schaltanlagen-Handbuch, ABB AG, Mannheim, 2015
- [5] Kurrat, Hochspannungstechnik I – Skript, Braunschweig, 2015