



Technische
Universität
Braunschweig



SEMINAR

STUDIENSEMINAR FÜR INNOVATIVE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte Teil 2

Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

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

Sommersemester 2017

Braunschweig, 05.07.2017

Inhaltsverzeichnis

Zeitplan	2
Hu - Historische Entwicklung und aktueller Stand der Vakuumschalttechnik für die elektrische Energieversorgung	4
Bericht	4
Präsentation	8
Methner - Zwangskommutierung in Hybridschaltgeräten. Wann ist sie sinnvoll?	19
Bericht	19
Präsentation	23
Zhang - Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulgestaltung	35
Bericht	35
Präsentation	43
Steinmann - Potentiale von Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen	58
Bericht	58
Präsentation	64
Berg - Stand der Technik von Mittelspannungs-Gleichstrom-Energieversorgungsnetze	76
Bericht	76
Präsentation	79
Rühmann - Normative Isolierstoffcharakterisierung in der Hochspannungstechnik und im Explosionsschutz	89
Bericht	89
Präsentation	94
Besheli -Frequenzgang von Leistungstransformatoren	103
Bericht	103
Präsentation	109
Gläßner - Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule in Schaltstrecken der Niederspannungstechnik	120
Bericht	120
Präsentation	124

Zeitplan am 05.07.2017 im Haus der Wissenschaft (Raum Veolia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
09:00 – 10:30	Vortrag	Huiyuan Hu	Historische Entwicklung und aktueller Stand der Vakuumschalttechnik für die elektrische Zwangskommütierung in Hybridschaltgeräten. Wann ist sie sinnvoll? Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulaestaltung
	Vortrag	Björn Methner	
	Vortrag	Yu Zhang	
10:30 – 10:45	Pause (Feedback-Runde)		
10:45 – 11:45	Vortrag	Christoph Steinmann	Potentiale von Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen
	Vortrag	Adrian Berg	Stand der Technik von Mittelspannungs-Gleichstrom-Energieversorgungsnetze
11:45 - 12:45	Mittag		
12:45 - 14:15	Vortrag	Niklas Rühmann	Normative Isolierstoffcharakterisierung in der Hochspannungstechnik und im Explosionsschutz
	Vortrag	Saeed Ghorbanpour Besheli	Frequenzgang von Leistungstransformatoren
	Vortrag	Janine Gläßner	Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule in Schaltstrecken der Niederspannungstechnik



Historische Entwicklung und aktueller Stand der Vakuumschaltechnik für die elektrische Energieversorgung

Huiyuan Hu,
Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**; Braunschweig;
huhuiyuan1991@gmail.com

Kurzfassung

In diesem Bericht wird auf den Stand der Forschung im Bereich der Vakuumschaltechnik und ihrer historischen Entwicklungen eingegangen. Hierzu zählt die Definition des Schalters, die Grundlagen des Leistungsschalters, Historie des Vakuumschalters, Aufbau und Funktion bzw. die Marktanteile des Vakuumschalters, der Vergleich mit anderen Löschmedien und ihre Vorteile. Anschließend werden aktuelle und zukünftige Stände vorgestellt. Zusätzlich werden exemplarisch die Vakuumschalter von chinesischen und europäischen Vakuumschalter-Hersteller verglichen.

Abstract

In this Seminar the basis, the Application area and different kinds of circuit breaker were first explained. Then the Vacuum circuit breaker which used in medium voltage area was explored. The structure, contact form, historic development, the modern status and some Chinese product of the vacuum circuit breaker were investigated. Its merit and comparisons with other circuit breaker will be also explained.

1 Einleitung

Unter Schaltung wird die Trennung und Herstellung einer elektrischen leitenden Verbindung durch einen Schalter verstanden. Bei der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie zwischen Erzeuger und Verbraucher haben Schaltgeräte unterschiedlichste Aufgaben [1]. In elektrischen Energieversorgungsnetzen können je nach Fehlerfall oder unsachgemäßer Anwendung kurzschlussströme fließen, die um ein vielfaches höher sind als die Betriebsströme. Kurzschlussströme müssen schnell abgeschaltet werden, um den Schaden im Netz zu minimieren. Für diese Aufgabe braucht man Leistungsschalter [2]. Verschiedene Kontaktgeometrien nutzen unterschiedliche physikalische Prinzipien, um den bei der Trennung der Kontaktstücke entstehende Lichtbogen zu löschen[4]. Es werden unterschiedliche Schaltgeräte für die verschiedenen Spannungsebenen eingesetzt. Im Mittelspannungsbereich wird heute hauptsächlich der Vakuumschalter verwendet, weil er im Vergleich zu mechanischen Schaltern mit anderen Löschmedien wartungsarm und sehr zuverlässig ist [1].

2 Theoretische Grundlagen

Ein Leistungsschalter ist ein mechanisches Schaltgerät. Er hat vorallem das Vermögen Kurzschlüsse abzuschalten. Zur Gruppierung ergeben sich der nullpunktlöschende Leistungsschalter und der strombegrenzende Leistungsschalter. Zum Löschen der beim Schalten entstehenden Lichtbogen gibt es verschiedene Löschmedien. Z.B. Luft, Isoliergas SF₆, Öl und Vakuum. [7]

Der Grundstein der Vakuumtechnik wurde durch den deutschen Physiker Friedrich Paschen im Jahre 1889

gelegt. Die erste Entwicklung eines Vakuumschalters befindet sich im Jahre 1926. Die erste Patentierung wurde 1930 in den USA angemeldet. Danach begann eine stetige Erforschung und Entwicklung des Vakuumschalters. [5]

Die Vorteile des Vakuumschalters werden durch hohe elektrische und mechanische Lebensdauer, Wartungsfreiheit, einen konstant niedrigen Kontaktwiderstand, geringen Kontaktthub und geringe bewegliche Masse, robuste und kompakte Bauweise ausgezeichnet [4]. Der Vakuumschalter besitzt auch eine hohe elektrische Festigkeit und eine schnelle Wiederverfestigung bei kleinen Kontaktabständen und geringer Baugröße [5]. Mit den geringen Anschaffungskosten von Vakuumschalter liegen weitere Vorteile in einer geringen Verlustleistung und Überspannungsempfindlichkeit. Ein wichtiger Vorteil ist auch ihre Unempfindlichkeit gegen elektromagnetische Störung, die oft in Hochstromsystemen entsteht [3].

In der Abbildung 1 wird gezeigt, dass Vakuumschalter im linken Bereich der Kurve arbeiten. Man kann es durch die kleine Schattenfläche deutlich erkennen, dass er durch den kurzen Schaltweg im Vergleich zu Schaltern mit anderen Löschmedien nur eine geringe Schaltenergie benötigt. In der Abbildung 1 zeigt uns auch einen Überblick über die Durchschlagfestigkeit verschiedener Isolations-Medien bei unterschiedlichem Drücken. Hier kann man erkennen, dass bei Vakuumschalter trotz des kleinen Kontaktabstands eine hohe Durchschlagspannung erreicht wird. [3]

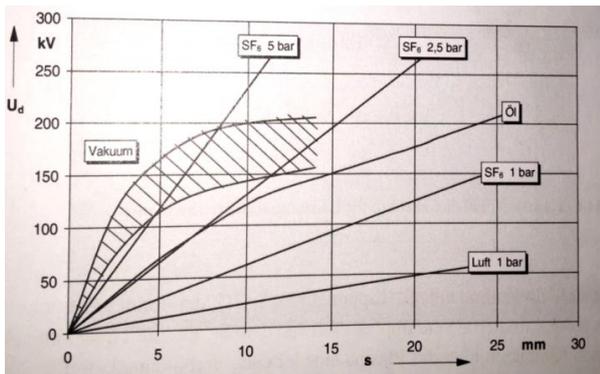


Abbildung 1 : Durchschlagsspannung unterschiedlicher Medien in Abhängigkeit von der Schlagweite[3]

Das Vakuumschaltprinzip wird heutzutage vorwiegend im Mittelspannungsbereich bis zu 84 kV eingesetzt [3]. Er hat im Mittelspannungsbereich einen sehr breiten und großen Markt gefunden. Der Vakuumschalter hat in 3 kV bis 38 KV-Anwendungen bis 2010 einen Marktanteil von 75% erreicht [4]. Vakuumschalter werden überwiegend als einpolige und dreipolige Schaltgeräte ausgeführt und aus einer bzw. drei Vakuumschaltkammern(eine je Phase) aufgebaut. Die Aufgabe des Antriebs(Magnet oder Federspeicherantrieb) ist es, dass die Schaltröhren auf Schalhub zu öffnen oder zu schließen [6]. Für das Kontaktdesign werden drei verschiedene Kontaktformen unterschieden: Plattenkontakt, RMF-Kontakt oder TMF-Kontakt und AMF-Kontakt [4].

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Ein deutlicher Schwerpunkt der Entwicklung des Vakuumschalters lag im Erreichen größerer Schaltleistungen einhergehend mit der Verringerung der Baugröße der Schaltkammern. Dabei wird auch der Anwendungsbereich mehr und mehr erweitert, um ihn auch immer kompakter und kostengünstiger ohne Einbußen bei der Schaltleistung anbieten zu können[4]. Wegen der kontinuierlichen Innovationskraft hat z.B. die Firma ABB am 18. April 2016 in Mannheim / Ratingen den Rekord die 5 Millionste Vakuumschaltkammer gefertigt. Heute hat die Firma ABB schon mehr als 2,5 Millionen Vakuum-Schaltkammern verschiedenster Bauarten weltweit im Einsatz[8].

3.1 Historie des Vakuumschalters

Der Grundstein der Vakuumtechnik geht auf das Jahr 1889 zurück. Danach ist bekannt, dass Elektrodenanordnung im Vakuum eine hohe Spannungsfestigkeit besitzen. Dabei ist die Durchschlagsspannung nur von Druck und dem Elektrodenabstand abhängig. Damit war die Idee für einen Vakuumschalter geboren. Wegen der fehlende fertigungstechnischen Bereich und des Grundlagenwissen über die physikalischen Vorgänge bei einem Lichtbogen im Vakuum, begann eine sehr lange Entwicklungsgeschichte. Die erste Entwicklung eines Vakuumschalters war im Jahre 1926. Die erste Patentierung wurde 1930 von General Electric in den

USA erworben. In den dreißiger bis fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts vollzog sich eine stetige Erforschung des Hochvakuaums. In den späten 1950er Jahren sind Schalter mit diesem Löschprinzip schon sehr weit verbreitet. Ein sehr wichtiger Meilenstein für die Forschungsarbeiten in der Entwicklung waren die Werkstofftechnologien. Dazu gehört das Finden geeigneter nicht gasender Werkstoffe, die den Innendruck nicht verschlechtern, sondern sehr effizient wirken. Zum ersten kommerziellen Einsatz des Vakuumschalters in Energieversorgungsnetzen kam es daher erst in den 1960 Jahren. Eine weitere Entwicklung ist verbindendes Herstellungsverfahren des Schweißens und Lötens u.a. auch von isolierenden Werkstoffen wie Glas und Keramik. Eine erfolgreiche Erforschung in dieser Zeit wurde bis knapp 1 kA und 41,5 kV erreicht. Nach weiterer innovativer Änderung bei Konstruktion und Materialeinsatz wurde ein endgültiger technischer Durchbruch und Erfolge des Vakuumschalters als umweltfreundliches, wartungsfreies Schalgerät in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts erlangt. [1][4][5]

3.2 Aufbau und Funktion des Vakuumschalters

Ein Vakuumschalter besteht aus dem Antrieb(Magnet oder Federspeicherantrieb) und aus einer bzw. drei Vakuumschaltkammern[6]. Ein prinzipieller typischer Aufbau in der Abbildung 2 besteht aus einem vakuumdichten evakuierten Gehäuse, das sich aus einem Isolierzylinder aus Glas oder Keramik, der mit zwei Metalldeckeln verschlossen ist. Gut zu erkennen ist die Anschlussbolzen, wobei der obere fest mit dem oberen Deckel verschweißt, während der untere beweglich ist. Die Schirmanordnung dient zur Kondensation des Metalldampfes bei einem Abschaltvorgang. Sie verhindern, dass sich beim Schaltvorgang entstehende Metalldämpfe auf den Isolierkörper niederschlagen, was die Isolationsfähigkeit der Keramik stark herabsetzt.

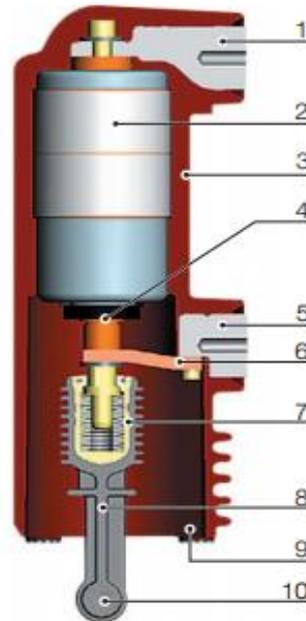


Abbildung 2 : Bauformen von Vakuumschaltkammern[9]

Der Druck in der Vakuumschaltkammer beträgt kleiner als 10^{-9} mbar, die freie Weglänge ist viel größer als die Gefäßabmessungen. Ebenso wie bei Schaltgeräten mit anderen Löschmedien entsteht im Vakuumschalter beim Trennen der Kontakte ein Metalldampfboogen, der durch äußere Energiezufuhr bis zum nächsten Stromnulldurchgang erhalten wird. Um eine Löschung im Stromnulldurchgang zu erreichen, muss auf jeden Fall verhindert werden, dass die Kontakte zu stark der Erosion durch den Vakuumbogen ausgesetzt sind. Zum Schutz der Kontaktstücke vor zu hoher thermischer Belastung durch das Plasma werden unterschiedliche Kontaktgeometrien verwendet. Es wird hauptsächlich zwischen dem Radialmagnetfeld-Kontakt und dem Axialmagnetfeld-Kontakt unterschieden. [5][12]

3.3 Aktueller Stand des Vakuumschalters

Für den aktuellen Stand werde ich zuerst exemplarisch die weltweit bekannte Firma Siemens und ABB mit dem Fokus auf den Vorteile und Unterschiede erläutern. Anschließend werden auch einige Produkte und Forschungen aus China dargestellt.

Vakuumschalter sind in Deutschland von dem Hersteller Siemens derzeit vorwiegend bis zu einer Bemessungsspannung von 40,5 kV verfügbar. Ihr Bemessungsstrom liegt bei 2,5 kA. Im Produktkatalog ist der Typ 3AH und 3Ae sehr bekannt. Es gibt auch Typ 3AV1FG/F1, der mit einer Bemessungsspannung 72.5 kV möglich ist. Entwickelt ist dort bereits ein Vakuumschalter mit einer Bemessungsspannung von 145kV. Dabei werden zwei in Reihe geschaltete Vakuumschaltröhren mit kleinerer Bemessungsspannung verwendet. [11]

In der Abbildung 3 zeigt man der Typ 3AH4. Bei Vakuumschalter-Typ 3AH hat Siemens in der Vergangenheit vorwiegend AMF-Kontaktgeometrie eingesetzt. Ein wichtiger Vorteil ist der Einsatz bei hoher Schalthäufigkeit, der bei Stromstärke innerhalb 2 kA bis zu 120.000 Schaltspiele durchführen kann (Schalter für höchste Schaltspielzahlen) [11].



Abbildung 3: Vakuumschalter von Siemens(3AH4)[11]

Von dem Hersteller ABB sind Vakuumschalter der Serie VD4 derzeit bis zu einer Bemessungsspannung von 40.5

kV verfügbar. Ihr Ausschaltvermögen und Kurzzeitstrom liegt bis zu 158 kA. In der Abbildung 4 wird ein Beispiel von VD4 dargestellt. Bei Vakuumschalt-Kammer für Leistungsschalter hat ABB in der Vergangenheit vorwiegend RMF-Kontaktgeometrie eingesetzt. In RMF bewegt sich der Vakuumbogen sehr schnell auf der Kontaktoberfläche. Dadurch wird die Erosion der Kontakte reduziert und die Stromunterbrechungsfähigkeit deutlich verbessert. Wegen der speziellen Konstruktionstechnik von VD4, ist die Polteile des Leistungsschalters besonders widerstandsfähig. Sie schützt auch die Schaltkammer vor Stößen, Staubablagerungen und Feuchtigkeit. Ein wichtiger Aspekt ist auch ihr serienmäßig vorgesehene mechanische Wiedereinschaltsperrung. [9]



Abbildung 4: Vakuumschalter von ABB(ABB-VD4)[9]

In China sind Vakuumschalter von den verschiedenen Firmen (z.B. Baoguang, Ziguang-dianqi) meistens bis zu einer Bemessungsspannung von 40,5 kV. Mit einer Bemessungsspannung von 72,5 kV sind Vakuumschalter z.B. von chinesischen Firma (New Concept Electric) auch verfügbar. Ihr Ausschaltstrom liegt bis zu 31,5 kA. Entwickelt dort ist auch die 145 kV-VLS, wobei hier auch zwei 72,5 kV Vakuumschaltröhren in Reihe geschaltet sind. Die Kosten zum Vergleich mit einem Leistungsschalter mit SF6 als isolierendes Medium sind nach Aussagen der chinesischen Firma noch zu hoch. Deswegen gibt es derzeit nur geringem Angebot im Markt. In Japan geht die Entwicklung weiter in Richtung eines 168 kV Vakuumschalter. Dabei werden auch zwei 84 kV Vakuumschaltröhren in Reihe geschaltet. Eine erforderliche Erforschung eines 252 kV-Vakuumschalters mit nur einer Schaltstrecke wurde an der Xian Universität im Jahre 2010 in China durchgeführt. [10] [12]

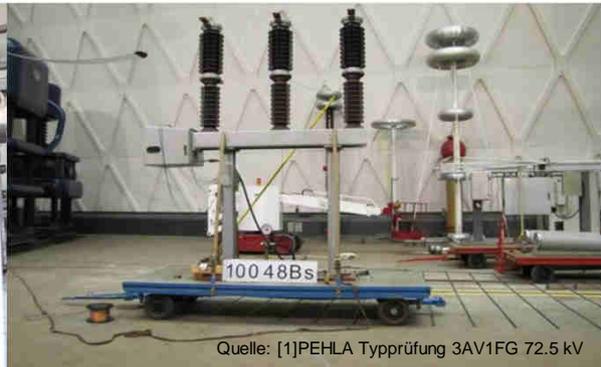
4 Zusammenfassung/Fazit

In diesem Bericht wurde die Historie, Grundprinzip und aktueller Stand der Vakuumschalttechnik mit dem Fokus auf den Vakuumleistungsschalter erläutert. Durch weitere Entwicklung ist Vakuumschalter bei der Technik in Zukunft möglich, dass er höhere Schaltspiele, geringere Energiebedarf für die Schaltbetätigung und weitere Kosteneinsparungspotenziale besitzt. Wegen ihrer klaren

Vorteile aus vielen Anwendungen, nimmt der Marktanteil des Vakuumschalters im Mittelspannungsbereich bis 40,5 kV jährlich stark zu. Heute wird weltweit ebenfalls die Möglichkeit untersucht, mit Vakuumschalter in die Spannungsbereiche von SF₆- Leistungsschalter zu gelangen. Eine wichtige Motivation ist dass, SF₆ ein Treibhausgas ist. Nach so vielen Erfahrungen steht fest, dass der Vakuumschalter eine große Zukunft haben wird.

5 Literatur

- [1] Hans, Joachim, Lippmann, Schalten im Vakuum ,Berlin: VDE, 2003.
- [2] Stefan Giere, Vakuumschalttechnik im Hochspannungseinsatz, Göttingen: CUVILLER VERLAG, 2004
- [3] Timo Wenzel; Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern in Flexible AC Transmission Systems(FACTS); 2011
- [4] Kathrin Steinke; Verhalten unterschiedlicher Kontaktsysteme in Vakuumleistungsschaltern bei hohen Schaltungsleistungen; 2008
- [5] Florian Körner; Kontaktverhalten von Vakuumschaltern beim kapazitiven Schalten; 2008
- [6] Christian Peter Wolf, Experimentelle Untersuchung des Hochstrom-Vakuumbogens auf Transversal-Magnetfeld-Kontakten, Verlag Dr. Hut, München; 2013
- [7] Ernst Slamecka, Prüfung von Hochspannungs-Leistungsschaltern; 2013
- [8] Rekord bei ABB in Ratingen, 18.April,2016.[online]. Available: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/45ba06e81eba41f4c1257f99004d73ec/\\$file/16_L01_Rekord+Ratingen.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/45ba06e81eba41f4c1257f99004d73ec/$file/16_L01_Rekord+Ratingen.pdf). [zugriff am 20.06.2017]
- [9] VD4, Mittelspannungs-Vakuum-Leistungsschalter, 05. März.2016.[online]. Available: [https://library.e.abb.com/public/fa12748520c4468cb99c54b747c528b5/CA_VD4-50kA\(DE\)V_1VC_P000001_DigiPrint.pdf](https://library.e.abb.com/public/fa12748520c4468cb99c54b747c528b5/CA_VD4-50kA(DE)V_1VC_P000001_DigiPrint.pdf). [zugriff am 20.06.2017]
- [10] Patentierung des Vakuumschalters mit 252kv in China, 06.Mai.2010. [online]. Available: http://www.yzogn.com/product/show_product.php?id=390. [zugriff am 20.06.2017]
- [11] Vakuumschalter bei der Firma Siemens, 18.june.2013.[online]. Available: www.siemens.com/katalog-vakuum-leistungsschalter-3ah3_de.pdf. [zugriff am 20.06.2017]
- [12] Innovationen im Bereich Hochspannung Vakuumschalter, 16. Mai.2017. [online]. Available: www.siemens.ch/energy/kundentag/download/01_Innovationen_im_Bereich_HS_Helbig_Energy_Systems_Kundentag_2017_V2.pdf. [zugriff am 20.06.2017]



Historische Entwicklung und aktueller Stand der Vakuumtechnik für die elektrische Energieversorgung

Huiyuan Hu, 05.07.2017

Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und aktueller Stand der Vakuumschalter
- Zusammenfassung



Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und aktueller Stand der Vakuumschalttechnik
- Zusammenfassung

Einleitung

- Einsatzbereich von Leistungsschaltern
 - I. Kurzschlusschutz
 - II. Anlagenschutz
 - III. Trennen
- Löschen der beim Schalten
entstehende Lichtbogen

- Typische Löschmedien des Leistungsschalters
 - I. Luft
 - II. SF6
 - III. Öl
 - IV. „Vakuum“

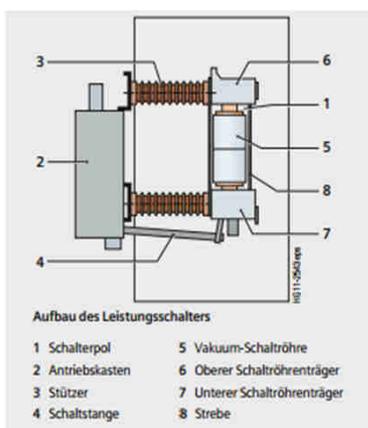


Quelle: [2]Vakuumschaltkammer(Siemens)

Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und aktueller Stand der Vakuumschalttechnik
- Zusammenfassung

Aufbau und Funktion

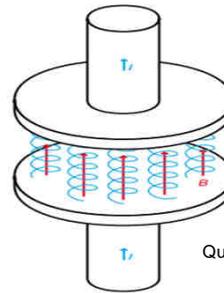


Quelle:
[2]VakuumschalterTyp3AH5(Siemens)

- Vakuumschalter 3AH5 bei der Firma Siemens
- Zusammensetzung des Vakuumschalters aus dem Schalterpol (1) und dem Antriebskasten (2)
- Befestigung des Schalterpols mit Hilfe von Stützer (3)
- Die Schaltbewegung mittels Schaltstangen (4) und Hebeln
- Zusammensetzung eines Schalterpols aus der Vakuum-Schaltröhre (5) und den Schaltröhrenträgern
- Befestigung der Schaltröhre am oberen Schaltröhren-Träger (6)
- Bewegbar des unteren Teils der Schaltröhre im unteren Schaltröhrenträger (8)

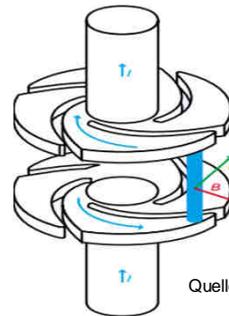
Aufbau und Funktion

- AMF- Kontaktgeometrie
- Axialmagnetfeld
- Eine parallel zum Stromfluss im Vakuumbogen angelegten Magnetische Flussdichte
- Reduzierung der Beweglichkeit der Ladungsträger
- Höhere Stromstärken



Quelle: [3] Axialmagnetfeld

- RMF- Kontaktgeometrie
- Radialmagnetfeld
- Eine Lorenzkraft auf den kontrahierten Vakuumbogen
- Schnelle Bewegung von Vakuumbogen
- Reduzierung der Erosion der Kontakte

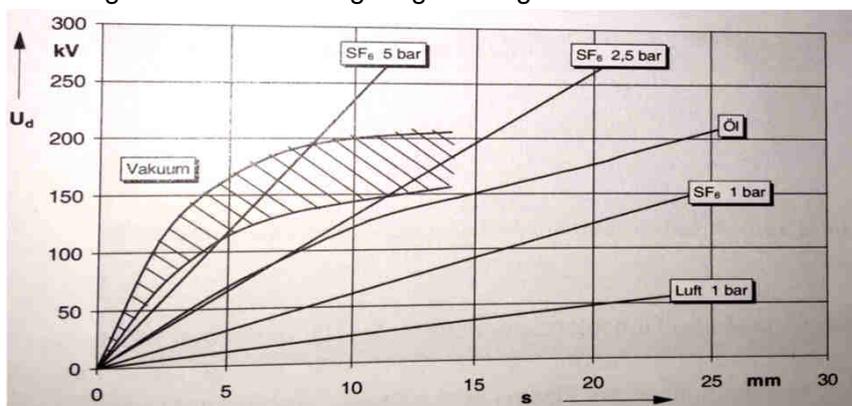


Quelle: [3] Radialmagnetfeld

Aufbau und Funktion

Vorteile des Vakuumschalters

- Hohe elektrische und mechanische Lebensdauer
- Hohe elektrische Festigkeit
- Wartungsfreiheit und schnelle Wiederverfestigung
- Geringe Verlustleistung und Überspannungsempfindlichkeit
- Geringe Kontakthub und geringe beweglich Masse



Quelle: [4] Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern in Flexible AC Transmission Systems, 2011

Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und Aktueller Stand der Vakuumschaltechnik
- Zusammenfassung

Historische Entwicklung

- Der Grundstein der Vakuumtechnik im Jahre 1889 durch Friedrich Pashen
- Erste Entwicklung eines Vakuumschalters im Jahre 1926
- Erste Patentierung bei Herr General Electric in USA im Jahre 1930
- Sehr weit verbreitet im Fokus der Forschung in den späten 1950er Jahren
- Erste kommerzielle Einsatz des Vakuumschalters in den 1960 Jahren
- Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren des Schweißens und Lötens bzw. die isolierenden Werkstoffen wie Glas und Keramik in den späten 1960er Jahren
- Weitere innovative Änderung bei Konstruktion und Materialeinsatz gelang in den 1980 Jahren
- Bis heute: Optimierungen des Schalters



Quelle: [5]Friedrich Pashen



Quelle: [6]Logos General Electric

Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und Aktueller Stand des Vakuumschalters
- Zusammenfassung

Einsatz des Vakuumschalters

- Spannungsbereich
 - I. Vorwiegend von 3 kV bis zur 40,5 kV-Ebene
 - II. 72,5 kV-Ebene und 84 kV-Ebene auch verfügbar
 - III. Aktuelle Forschungen bis zur 252 kV-Ebene
- sehr großer Marktanteil im Mittelspannungsbereich
 - I. Marktanteil des Vakuumschalters weltweit über 60%
 - II. Marktanteil im Jahre 2010 in Deutschland betrug 75%
 - III. Stetige jährliche Zunahme des Marktanteils

Aktueller Stand der Vakuumschalter

- Marktanteil im Mittelspannungsbereich in Deutschland seit 2010 schon über 75%
- Siemens und ABB im Markt sehr bekannt
- Vorwiegend AMF-Kontaktgeometrie bei der Firma Siemens und TMF-Kontaktgeometrie bei der Firma ABB
- Höhere Schaltspiele bei der Firma Siemens
- Besser gegen Umwelteinflüsse bei der Firma ABB
- Siemens und ABB mit Spannungsbereich vorwiegend bis zur 40.5 kV- Ebene
- Geplante Verfügbarkeit des Vakuumschalters 3AV1FG mit Bemessungsspannung bis zu 145 kV ab Ende 2017
- Aktuelle Forschungen und Entwicklungen des Vakuumschalters bis zur 252 kV in China

Aktueller Stand des Vakuumschalters

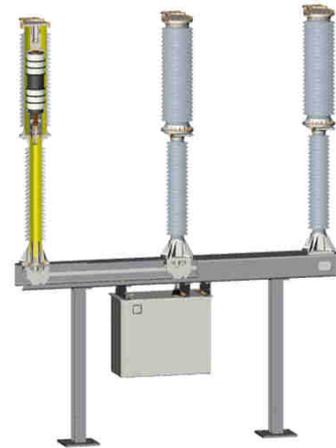
- Vakuumschalter bei der Firma Siemens
- Sehr bekannt Typ im Katalog 3AH und 3Ae
- Bemessungsspannung bis 40.5 kV
- AMF-Kontaktgeometrie(Höhere Stromstärke)
- 3AH4 (der Schalter für höchste Schaltspiele)mit Spannung bis 36 kV und Betriebsstrom bis 2 kA 120.000 Schaltspiele möglich



Quelle: [7]Vakuumschalter 3AH4 (Siemens)

Aktueller Stand des Vakuumschalters

- Vakuumschalter 3AV1FG/FI von Siemens
- Bemessungsspannung von bis zu 145 kV
- Bemessungs-Ausschaltstrom von bis zu 40 kA
- Zwei 72.5 kV in Reihe geschaltete Vakuumschaltröhren
- AMF-Kontaktgeometrie
- Bemessungsspannung bis zu 72.5 kV seit 2010 schon im Betrieb
- Geplante Verfügbarkeit des Vakuumschalters 3AV1FG-145 kV ab Ende 2017



Quelle: [1]Vakuumschalter 3AV1FG(Siemens)

Aktueller Stand des Vakuumschalters

- Vakuumschalter VD4 bei der Firma ABB
- Rekord im Jahre 2016 für die 5 Millionste Vakuumschaltkammer
- Serie VD4 sehr bekannt
- Bemessungsspannung auch bis 40.5 kV verfügbar
- TMF-Kontaktgeometrie
- Spezielle Konstruktion
 - Polteile des Schalters besonders widerstandsfähig
 - Schutz vor Stößen, Staubablagerungen und Feuchtigkeit



Quelle: [8]Vakuumschalter VD4(ABB)

Aktueller Stand des Vakuumschalters in China

- Vakuumschalter aus chinesischen Firma New Concept Electric
- Bemessungsspannung bis 72.5 kV
- Anwendung seit 2006
- Ausschaltstrom bis 31.5 kA
- Bis 10000 Schaltspiele möglich
- Patentierung im Jahre 2010 für Vakuumschalter mit 252 kV an der Uni Xian in China
- Die Kosten für Vakuumschalter über 84 kV zum Vergleich mit SF6 noch zu teuer



Quelle: [9] Vakuumschalter AB-3S-72.5(New Concept Electric)

Vergleich

Siemens	ABB
Höhere Schaltspiele	Höhere Umweltverträglichkeit
AMF(Höhere Stromstärke)	TMF(einfacherer Aufbau)
Höhere Spannungsbereich	Größere Einsatzbereiche (Schalten, Schützen)

- Vorteile von China
 - I. Große Nachfrage von Vakuumschalter
 - II. Mehr Erfahrung und Erforschung des Vakuumschalters mit Spannung über 40.5 kV
 - III. Mehr verschiedenen Bauarten und Produkten
 - IV. Preis günstiger
- Vorteile von Deutschland
 - I. Bessere Lebensdauer und Wartungsfreiheit
 - II. Mehr Schaltspiele
 - III. Besser Wettbewerbsvorteil im Weltmarkt bei Firma Siemens und ABB

Agenda

- Einleitung
- Aufbau und Funktion
- Historische Entwicklung
- Einsatz und Aktueller Stand der Vakuumschaltechnik
- Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Vorstellung des Aufbaus und der Funktion eines Vakuumschalter
- Historische Entwicklung der Vakuumschaltechnik
 - Erforschung 1889 – 1980
 - Ab 1980 konventionelle Vakuumschalter
 - Bis heute Optimierung
- Aktueller Stand
 - Marktanteil im Mittelspannungsbereich schon über 75%
 - ABB und Siemens mit Spannungsbereich vorwiegend bis 40.5 kV
 - Entwickelte Vakuumschalter in Deutschland bis 145 kV
 - Patentierung im Jahre 2010 für Vakuumschalter mit 252 kV in China
- Ausblick
 - I. Zunahme des Marktanteils von Vakuumschalter
 - II. Mehr Einsatz des Vakuumschalters mit Spannung über 40.5 kV
 - III. Stetige Optimierung der vorhandenen Schalttechnik
 - IV. Kleineren Energiebedarf für die Schaltbetätigung



Literaturverzeichnis

- [1] Innovationen im Bereich Hochspannung, 16.Mai.2017. [online]. Available:
https://www.siemens.ch/energy/kundentag/download/01_Innovationen_im_Bereich_HS_Helbig_Energy_Systems_Kundentag_2017_V2.pdf.
[Zugriff am 20.06.2017]
- [2] Vakuum- Leistungsschalter, 11.Mai.2010. [online]. Available:
https://w3.siemens.com/powerdistribution/global/SiteCollectionDocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-circuit-breaker/3ah5/katalog-vakuum-leistungsschalter-3ah5_de.pdf. [Zugriff am 20.06.2017]
- [3] Vakuum- Schaltkammern, 12.August.2017. [online]. Available:
https://library.e.abb.com/public/b5f9deae06d35c78c1256acc002f36a2/ABB-Technik_1-01-Vakuum.pdf. [Zugriff am 20.06.2017]
- [4] Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern in Flexible AC Transmission Systems, 2011
- [5] Fridrich Pashen (Physiker), 21.Februar.2017. [online]. Available:
[https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Paschen_\(Physiker\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Paschen_(Physiker)). [Zugriff am 20.06.2017]
- [6] General Electirc, Logs Wikia, 17.März.2007. [online]. Available:
https://www.google.de/?gws_rd=ssl#q=general+electric+1930. [Zugriff am 20.06.2017]
- [7] Vakuum-Leistungsschalter 3AH4, 04.August.2010. [online]. Available:
http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/sitecollectiondocuments/en/mv/indoor-devices/vacuum-circuit-breaker/3ah4/katalog-vakuum-leistungsschalter-3ah4_de.pdf. [Zugriff am 20.06.2017]
- [8] VD4, Mittelspannungs-Vakuum-Leistungsschalter 3AH4, 02.June.2009. [online]. Available:
[https://library.e.abb.com/public/fa12748520c4468cb99c54b747c528b5/CA_VD4-50kA\(DE\)V_1VCP000001_DigiPrint.pdf](https://library.e.abb.com/public/fa12748520c4468cb99c54b747c528b5/CA_VD4-50kA(DE)V_1VCP000001_DigiPrint.pdf). [Zugriff am 20.06.2017]
- [9] Vakuumschalter AB-3S-72.5(New Concept Electric), 03.Spetember.2009. [online]. Available:
http://www.yzgn.com/product/show_product.php?id=390. [Zugriff am 20.06.2017]



Zwangskommutierung in Hybridschaltgeräten. Wann ist sie sinnvoll?

Constrained commutation in Hybrid Circuit Breakers.

Björn Methner, Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, b.methner@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

DC – Netze erhalten in der heutigen Zeit eine wichtige Stellung. Hochspannungsgleichstromnetze werden gebaut, DC – Systeme werden auf Schiffen und Flugzeugen verwendet und fast jedes Gerät im Haushalt benötigt Gleichstrom. Um der Nachfrage nachzukommen, werden Schalter benötigt, die die hohen Ströme und Spannungen führen und schalten können. Weitere Aspekte bei dem Design eines Schalters sind außerdem Schaltzeit, Verluste, Größe, Wartung etc. Um die Vorteile eines mechanischen Schalters und eines Halbleiterschalters zu vereinen hat man die beiden Elemente zusammengeschaltet. Das Ergebnis ist ein Hybridschaltgerät, welches in Zukunft die DC – Versorgung effizienter sichern soll [1].

Abstract

DC grids get more important in the present time. This leads to an increasing demand for DC circuit breakers, which can be found in high voltage DC grids, on ships and planes e.g. Mechanical circuit breakers face the problem of long switching times and arcing, which leads to erosion and limited switching cycles. Power semiconductors don't have these issues, but power loss is a serious problem. Therefore, hybrid switches combine both techniques and advantages.

1 Einleitung

Mechanische Schalter sind in der Lage hohe Ströme mit geringen Verlusten zu führen, jedoch entstehen beim Öffnen eines mechanischen Schalters Lichtbögen. Verschleiß an den Kontakten und ein hoher Wartungsaufwand sind oftmals die Konsequenzen [2].

Halbleiterschalter eliminieren die Nachteile eines mechanischen Schalters. Schnelle Schaltzeiten sind ein Vorteil. Zu bedenken ist, dass bei der Verwendung eines Halbleiterschalters vergleichsweise hohe Verluste auftreten. Kühlung und niedrigere Stromtragefähigkeiten sind weitere Aspekte [1] [2].

Eine Lösung für diese Probleme stellt ein Hybridschalter dar. Je nach Bauweise kann ein Hybridschalter für DC als auch für AC Anwendungen Verwendung finden. Interessant wird die Bauform in DC Anwendungen, da weder Spannung noch Strom natürlicherweise durch den Nullpunkt verlaufen. In AC Systemen stellt dies keine Schwierigkeit dar. Aufgrund dessen wurden für DC Systeme zwei grundsätzliche Methoden zur Nullerzeugung des Stroms entwickelt. „Zero Voltage Switching“ (ZVS) und „Zero Current Switching“ (ZCS) werden diese genannt. ZVS wird durch einen parallelen Kommutierungspfad ermöglicht, während ZCS einen Gegenpuls erzeugt, der den Strom im Schalter zu null zwingt. Im Gegensatz zu mechanischen Schaltern ermöglicht dies kürzere Lichtbogenzeiten oder gar lichtbogenfreies Schalten [1].

2 Theoretische Grundlagen

Das einfachste Modell zur Realisierung eines Hybridschalters wäre ein mechanischer Schalter und parallel dazu ein Halbleiterschalter. Zur Auswahl der

Halbleiterschalter stehen beispielsweise IGBTs, (MOS)FETs oder auch Thyristoren [3].

Im Normalfall ist der mechanische Schalter das leitende Element. Soll der Schaltvorgang eingeleitet werden, so wird der Halbleiterschalter angeschaltet. Der mechanische Schalter wird geöffnet und es entsteht ein Lichtbogen. Nun beginnt der Strom in den Halbleiter zu kommutieren, da dieser Pfad eine geringere Impedanz aufweist. Der mechanische Schalter wird elektrisch entlastet und baut seine dielektrische Fertigkeit wieder auf, sodass ein Lichtbogen sich nicht erneut formen kann. Der mechanische Schalter ist nun vollständig geöffnet. Folglich wird der Halbleiterschalter ausgeschaltet und die restliche gespeicherte Energie im System wird durch ein ebenfalls parallel liegendes Glied (Varistor, Widerstand oder Kapazität) absorbiert. Zur Limitierung von Spannungsspitzen können Dämpfungsglieder eingebaut werden (bspw. RC-Glied).

Um das System wieder in Betrieb zu nehmen, wird zunächst der Halbleiterschalter angeschaltet. Der Strom beginnt durch den Halbleiter zu fließen. Danach wird der mechanische Schalter geschlossen und abschließend der Halbleiterschalter wieder abgeschaltet [1] [2] [3].

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Im Folgenden wird die auf die unterschiedlichen Umsetzungsmöglichkeiten von Hybridschaltern eingegangen. Es soll dabei ein Hauptaugenmerk auf die bereits erwähnten Methoden ZVS und ZCS gelegt werden. Zu Diskutieren bleibt, welche Bauelemente benötigt werden, welche Verschaltungsmöglichkeiten sich ergeben und welche Anforderungen an die Bauelemente gestellt werden. Mögliche Auslegungen werden

dargestellt. Zu guter Letzt werden Vor- und Nachteile der gewählten Methoden aufgezeigt.

3.1 Erste Anfänge und Grundlagen

Die ersten Versuche einen Hochspannungshybridschalter zu bauen stammen von Jürgen Häfner [3]. Wie in **Bild 1** zu sehen ist, besteht ein Hybridschalter aus mindestens einem mechanischen Schalter S_H und einem parallel geschalteten Halbleiterschalter Q . Optional befindet sich in Reihe ein Isolationsschalter S_I . Im Normalbetrieb führt der blau markierte Pfad den Strom. Beim Ausschaltvorgang schaltet sich der Halbleiterschalter ein. Der mechanische Schalter öffnet sich nun und der Strom kommutiert auf den rot markierten Pfad, da dieser im Vergleich zum blauen Pfad eine sehr kleine Impedanz darstellt [4]. In AC – Systemen kann der Fehlerstrom aufgrund des natürlichen Nulldurchgangs unterbrochen werden. In DC – Systemen werden dafür weitere Bauelemente benötigt. Beim Unterbrechen des Stromes durch den Halbleiterschalter können aufgrund der Induktivität des Stromkreises hohe Spannungen entstehen. Zum Schutz des Halbleiterschalters werden daher weitere Elemente benötigt. Ein Überspannungsschutz im Form eines Varistors ist eine einfache Lösung dieses Problems. Natürlich können Hybridschalter in AC – Systemen Verwendung finden, solange die Halbleiter bidirektional angeordnet sind [4].

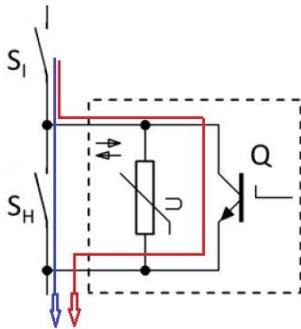


Bild 1 Hybridschalter

3.1.1 ZVS

Die erste vorzustellende Topologie lautet ZVS. In DC – Systemen gibt es keinen natürlichen Nulldurchgang der Spannung. Abhilfe schafft hier die ZVS Methode. Das Prinzip wird in **Bild 2** aufgezeigt. Hier teilt sich der Hybridschalter in einen Pfad mit dem mechanischen Schalter und einen Pfad mit dem Kommutierungspfad auf. Durch das Kommutieren des Stroms in den parallelen Pfad wird die Spannung sehr nah bei null während des Öffnen des mechanischen Schalters gehalten. Erweitern lässt sich das Ganze mit einem 3. Pfad wie in Bild 2, der die im System gespeicherte Energie aufnimmt umso andere Bauelemente zu schützen [1].

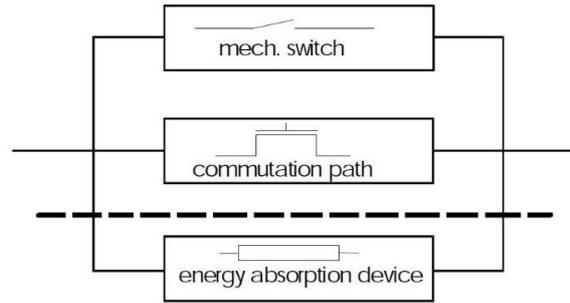


Bild 2 Prinzip ZVS

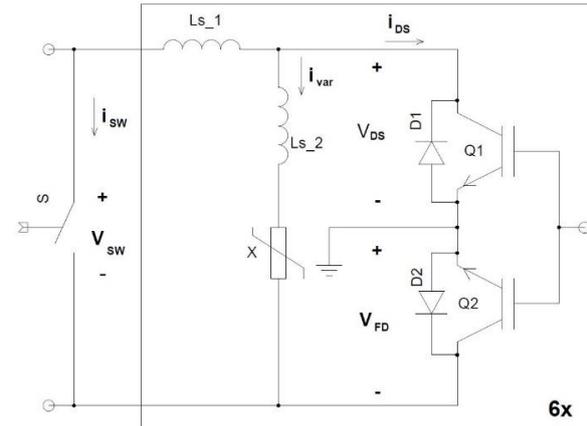


Bild 3 ZVS - Hybridschalter

Mit diesem Wissen lässt sich ein erster Hybridschalter wie in **Bild 3** konstruieren. S ist hier der mechanische Schalter, Q_1 und Q_2 die Halbleiterschalter, X der Überspannungsschutz und L_1 und L_2 sind die Induktivitäten.

Bei der Auslegung eines Hybridschalters spielen die Induktivität und die Spannung des Lichtbogens eine wichtige Rolle. Nach Formel (1) können die größten Ströme bei großer Lichtbogenspannung und kleiner Induktivität geschaltet werden.

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{ZVS} \approx \frac{u_{Schalter}}{L} \quad (1)$$

Der Überspannungsschutz sorgt dafür, dass die im zu schaltenden Stromkreis enthaltene Energie umgesetzt wird. Zu beachten ist, dass weiterhin Energie durch die Quelle geliefert wird. Das Bauelement sollte also dementsprechend ausgewählt werden [5].

Eine weitere Verbesserung wäre eine Dämpfung des Halbleiterschalters. Diese wird parallel zum Halbleiter geschaltet. Eine RCD – Dämpfung ist eine Maßnahme, um vor Spannungsspitzen zu schützen. Ein Beispiel zeigt **Bild 4**. Schaltet sich der Halbleiter schneller ab als der Überspannungsschutz bereit ist und keine Dämpfung ist vorhanden, kann der Halbleiter zerstört werden. Die Dämpfung sorgt für einen kleineren Abschaltgradienten du/dt , sodass es zu keinen Schäden an den Bauelementen kommt [1].



Bild 4 ZVS – Hybridschalter mit RCD - Dämpfung

3.1.2 ZCS

ZCS ist eine weitere Möglichkeit einen Hybridschalter für DC – Systeme zu realisieren. Im Gegensatz zum ZVS wird bei ZCS ein künstlicher Stromnulldurchgang erzeugt. **Bild 5** ist das Prinzip zu entnehmen. Der Aufbau enthält ebenfalls einen Pfad mit mechanischen Schalter, statt eines Kommutierungspfads ist ein Gegenpuls Pfad vorzufinden. Kurz bevor die Kontakte des mechanischen Schalters sich öffnen, wird ein Gegenpuls erzeugt, der dem Strom im Hauptpfad entgegengerichtet ist. Durch den Puls wird ein Nulldurchgang des Stroms kreiert und der mechanische Schalter öffnet sich unter diesen Bedingungen. Das Prinzip lässt sich analog auch mit einem Überspannungsschutz erweitern [5].

Ein sehr simpler ZCS – Hybridschalter ist in **Bild 6** zu sehen. Er besteht aus einem mechanischen Schalter *S*, einer Induktivität *L*, einer Kapazität *C*, einem Thyristor *T* und einem Überspannungsschutz. Soll der Schalter *S* geöffnet werden, so wird der Thyristor aktiviert. Das hat zur Folge, dass der vorher aufgeladene Kondensator sich entladen kann. Der Thyristor ist so platziert, dass der Entladevorgang dem Stromfluss im Hauptpfad entgegengerichtet ist. Der Strom im Hauptpfad wird vermindert und der Schalter kann geöffnet werden. Der Strom durch den Schalter wird nah bei null gehalten. Das reduziert die Lichtbogenzeit und die elektromagnetische Störaustrahlung. Nach diesem Vorgang kommt der Überspannungsschutz zum Einsatz und setzt die im System gespeicherte Energie um [5].

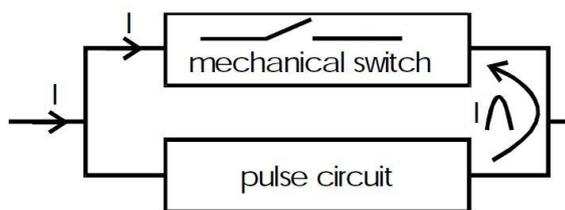


Bild 5 Prinzip ZCS



Bild 6 ZCS – Hybridschalter

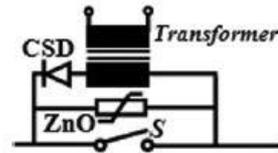


Bild 7 ZCS – Hybridschalter mit aufladbarer Diode

Zur Erzeugung des Nulldurchgangs des Stroms muss die Kapazität eine gewisse Größe aufweisen, dass der Kondensatorstrom mindestens so groß sein muss wie der des Hauptpfads. Eine Beziehung zwischen *L*, *C* und der Ladungsspannung des Kondensators liefert Gleichung (2).

$$u_c - \hat{i}_c * \sqrt{\frac{L}{C}} = 0 \quad (2)$$

Ein großes *di/dt* resultiert in einer schnellen Löschung des Lichtbogens und wiederum in der Fähigkeit, große Ströme schalten zu können. Das gesuchte *di/dt* kann näherungsweise mit Gleichung (3) bestimmt werden.

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{zcs} \approx \frac{u_c}{L} \quad (3)$$

Ein großer Unterschied gegenüber ZVS ist, dass ein ZCS – Hybridschalter nicht nur von der Induktivität *L*, sondern auch von der Spannung des Kondensators *u_c* und dessen Kapazität *C* abhängt. Das ermöglicht mehr Freiheiten, wenn es um das Design des Schalters geht [5].

Eine weitere Umsetzung ist in **Bild 7** zu sehen. Parallel zum Schalter *S* ist ein Transformator mit aufladbarer Diode (CSD). Soll der Schaltvorgang eingeleitet werden, so wird die Diode von dem Transformator mit kurzen Stromstößen aufgeladen. Ist der Vorgang abgeschlossen wird der Schalter *S* geöffnet. Der Strom kommutiert in den zu *S* parallelen und niederohmigen Pfad durch CSD. Die Diode bildet einen Kurzschluss in entgegengesetzter Richtung, bis diese sich entleert hat. Das entgegengesetzte Führen des Stroms führt zu Ladungstrennung im pn – Übergang der Diode. Es fällt folglich eine Spannung über der Diode ab, sodass sichergestellt werden muss, dass die Kontakte von *S* weit genug auseinander stehen. Ansonsten könnte der Schalter wieder leitend werden [4].

3.1.3 Weitere Topologien

Reicht die Lichtbogenspannung des mechanischen Schalters während eines Schaltvorgangs nicht aus, so sind weitere Elemente nötig, damit der Strom kommutiert. Eine Lösung des Problems ist ein „load commutation switch“ (LCS). Dieser ist in Serie mit dem mechanischen Vakuumschalter verbaut (vgl. **Bild 8**). Der Schaltvorgang wird mit dem Einschalten des „direct – current commutation circuit breaker“ (DCCB) – Zweigs und dem Abschalten des LCS initiiert. Mit dem Abschalten des LCS kann eine sehr hohe Spannung generiert werden. Diese ist um ein vielfaches höher als die Spannung des DCCB, sodass der Strom in sehr kurzer Zeit kommutiert.

Hierbei handelt es sich lediglich um einige Hundert Mikrosekunden. Nach der vollständigen Kommutierung des Stromes in den Kommutierungspfad kann der mechanische Vakuumschalter geöffnet werden. Dabei wird ein Lichtbogen vermieden. Argumente für dieses Verfahren sind also geringe Schäden an den Kontakten sowie eine hohe dielektrische Festigkeit des Schalters [6]. Diese Topologie ist verbesserungsfähig, da LCS hohe Kosten und hohen Verbrauch aufgrund der Vielzahl an IGBTs bedeutet.

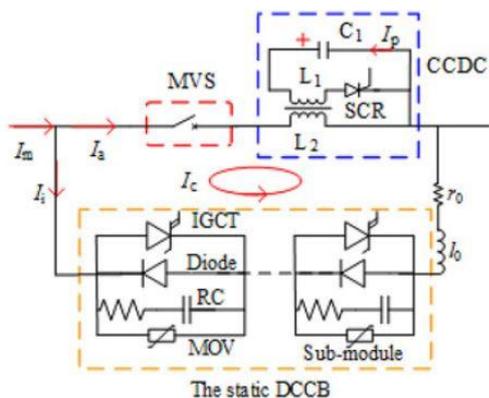


Bild 8 Hybridschalter mit CCDC

Das LCS sei nun durch einen „current commutation drive circuit“ (CCDC) ersetzt. Dies ist in **Bild 8** zu sehen. Der mechanische Vakuumschalter (MVS) ist in Reihe mit der Wicklung L_2 . Diese ist induktiv mit der Wicklung L_1 gekoppelt. Diese liegt in Reihe mit einem Thyristor SCR und einer Kapazität C_1 . Zum Schalten wird zunächst ein Anschaltssignal an das DCCB gesendet. Folgend wird der Thyristor eingeschaltet. Nun wird über L_1 eine Spannung in L_2 induziert, welche wiederum einen Maschenstrom I_c erzeugt. Der Strom I_a durch MVS wird zu null gezwungen. Die an MVS anliegende Spannung beträgt nur einige Hundert Volt. Dies ist nicht ausreichend für ein erneutes Entstehen eines Lichtbogens und der Kommutierungsprozess ist abgeschlossen. Die Schaltzeit während dieses Vorgangs beträgt bei der verbesserten Version 2ms [6].

4 Zusammenfassung

Hybridschalter stellen eine gute Alternative gegenüber herkömmlichen Schaltern dar. Das Ergebnis sind Schalter mit reduzierter Lichtbogenzeit und damit geht eine

längere Lebenszeit des Schalters einher. Dementsprechend muss weniger Aufwand für Wartungsarbeiten aufgewendet werden. Der geringere Energieverbrauch gegenüber herkömmlichen Halbleiterschaltern trägt darüber hinaus zur Kosteneinsparung bei.

Positiv festgehalten werden kann, dass ZVS – Schalter während des Anschaltens keinen Lichtbogen erzeugen und das keine großen Komponenten zur Gegenpulserzeugung verbaut werden müssen. ZCS – Schalter hingegen können größere Ströme schalten bei einer geringeren Anzahl von verbauten Halbleitern. Darüber hinaus müssen die Halbleiter nur zum Einschalten benutzt werden. Der Strom – Gradient di/dt ist größer und es sind mehr Freiheiten in punkto Design gegeben. Hybridschalter können für unterschiedliche Einsatzgebiete Verwendung finden. Da Hybridschalter generell auch in AC – Systemen verbaut werden können, sind sie sehr vielseitig einsetzbar.

Mit innovativen Ideen lassen sich Hybridschalter stetig verbessern. Mit dem Einsatz des CCDC ließen sich Kosten einsparen und die Schaltzeit signifikant verbessern. Grenzen werden erreicht, wenn sehr große Ströme geschaltet werden sollen. Dort sind vor allem die Halbleiter der limitierende Faktor.

5 Literatur

- [1] Polman H., Kaanders M., Design of a bi-directional 600V/6kA ZVS Hybrid DC switch using IGBTs, 2001
- [2] D. Bösch, E. Wilkening, H. Köpf, M. Kurrat, Hybrid DC Circuit Breaker Feasibility Study, Braunschweig: 2015.
- [3] A. Hassanpoor, J. Häfner, B. Jacobson, Technical Assessment of Load Commutation Switch in Hybrid HVDC Breaker, 2014.
- [4] A. Shukla, G. D. Demetriades, A Survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies, 2014
- [4] Polman H., Kaanders M., Design of a bi-directional 600V/6kA ZVS Hybrid DC switch using IGBTs, 2001
- [5] B. Roodenburg, A. Taffone, Combined ZVS-ZCS topology for high-current direct current hybrid switches: design aspects and first measurements, 2007
- [6] W. Wen, Y. Huang, Research on Current Commutation Measures for Hybrid DC Circuit Breakers, 2016



Zwangskommütierung in Hybridschaltgeräten. Wann ist sie sinnvoll?

Björn Methner, 05.07.2017

Agenda

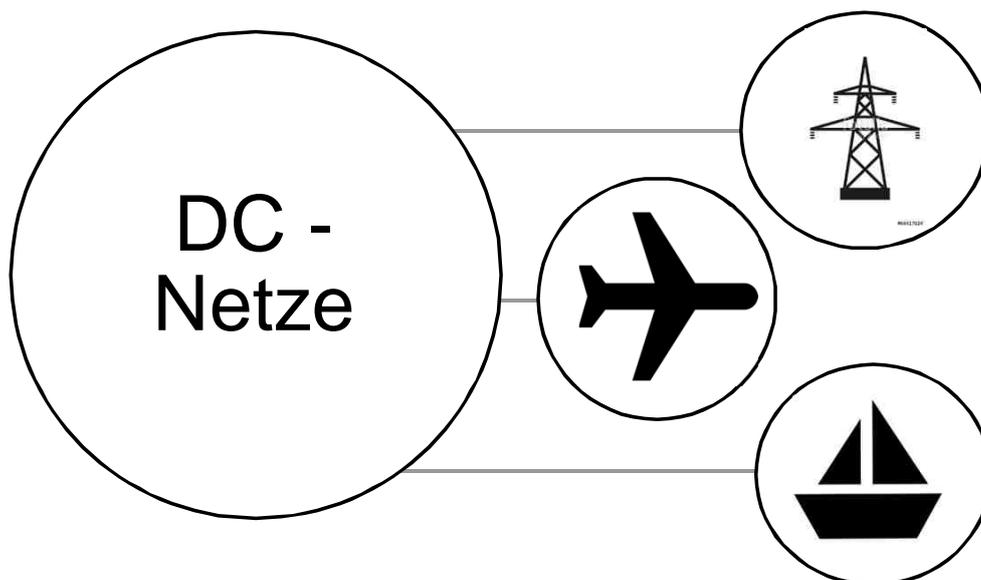
- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

Einleitung/Motivation

- DC – Netze nehmen zunehmend eine wichtige Stellung ein
- Schnelle und zuverlässige Schalter werden benötigt



Einleitung/Motivation

Konventionelle Schalter vs. Leistungshalbleiter



Geringe Verluste	Relativ hohe Verluste und Kühlung
Hohe Stromtragefähigkeit	Niedrige Stromtragefähigkeit
Hohe Isolierung im geöffneten Zustand	Niedrige Isolierung im geöffneten Zustand
Langsames Schalten mit Lichtbogen	Schnelles, lichtbogenfreies Schalten
Verschleiß an den Kontakten	Geringe Wartungsarbeiten

Einleitung/Motivation

- Kombination ergibt einen Hybridschalter
- Hybridschalter vereinen die Vorteile der Schalter

Geringe Verluste	Relativ hohe Verluste und Kühlung
Hohe Stromtragefähigkeit	Niedrige Stromtragefähigkeit
Hohe Isolierung im geöffneten Zustand	Niedrige Isolierung im geöffneten Zustand
Langsames Schalten mit Lichtbogen	Schnelles, lichtbogenfreies Schalten
Verschleiß an den Kontakten	Geringe Wartungsarbeiten

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

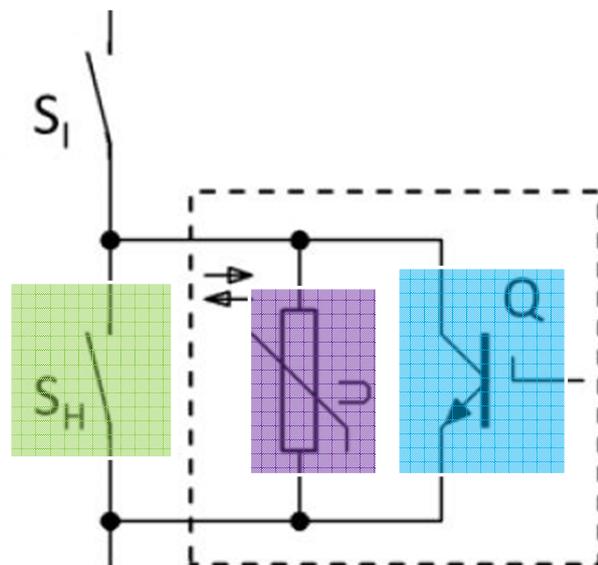
Theoretische Grundlagen

- **Aufbau:**

Mechanischer Schalter S_H

Halbleiter Q

Überspannungsschutz U

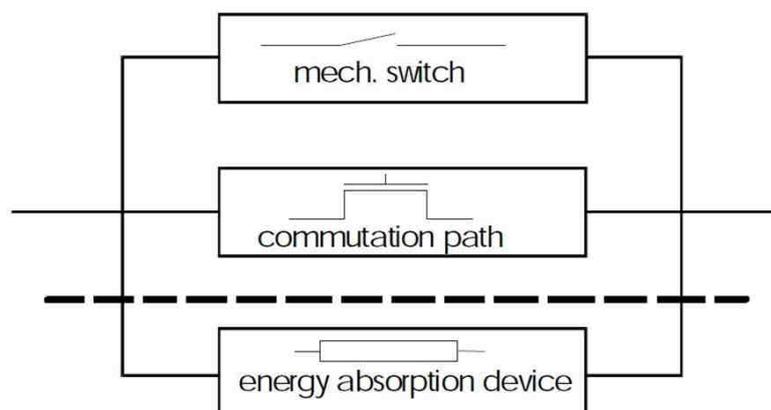


Agenda

- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

ZVS – Technologie

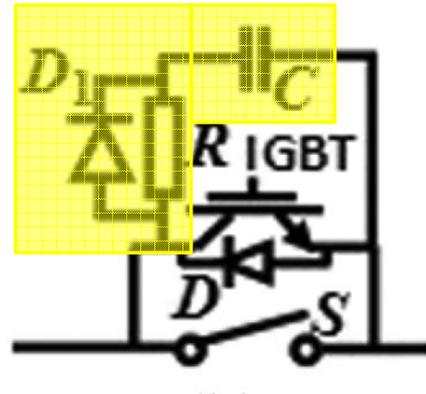
- ZVS = **Z**ero **V**oltage **S**witching
- Spannung wird vor dem Schalten sehr nah bei null gehalten



ZVS – Technologie

Beispiel(e):

- Lichtbogenspannung und Induktivität legen Verhalten des Hybridschalters fest
 - $\left(\frac{di}{dt}\right)_{ZVS} \approx \frac{u_{Schalter}}{L}$
- Überspannungsschutz setzt die im System vorhandene Energie um
- RCD – Dämpfung schützt vor Spannungsspitzen
 - Dämpfung ist bei sehr schnellem Abschalten des Leistungshalbleiters Halbleiters notwendig

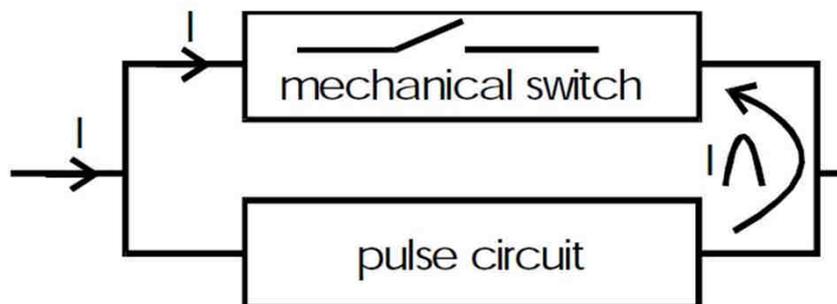


Agenda

- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

ZCS – Technologie

- ZCS = Zero Current Switching
- Strom wird vor dem Schalten sehr nah bei null gehalten



ZCS – Technologie

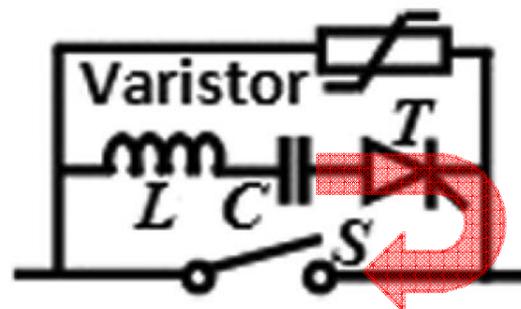
Beispiel(e):

- Großer Stromgradient di/dt ermöglicht schnelles Löschen des Lichtbogens
- → größere Ströme können geschaltet werden

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{ZCS} \approx \frac{u_c}{L}$$

- Mehr Freiheiten im Design
- Ermittlung von L , C und der Ladungsspannung des Kondensators:

$$u_c - \hat{i}_c * \sqrt{\frac{L}{C}} = 0$$



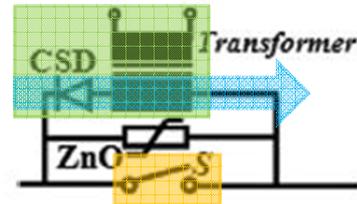
ZCS – Technologie

Beispiel(e):

- Transformator mit aufladbarer Diode (CSD) parallel zum Schalter S

- Schaltvorgang:

- Aufladung der Diode über den Transformator
- Öffnen von S führt zur Zwangskommütierung des Stroms
- CSD bildet bis zur Entladung einen Kurzschluss in entgegengesetzter Richtung



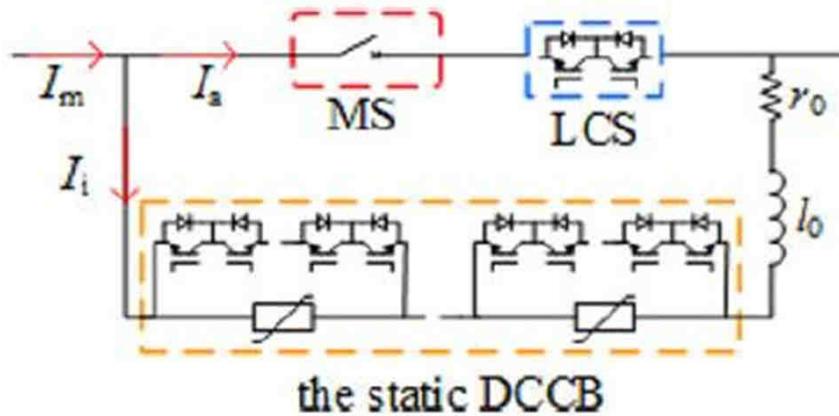
- Entgegengesetztes Führen des Stroms für zu Ladungstrennung im pn – Übergang der Diode
- → Kontakte von S müssen weit genug auseinanderstehen

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Theoretische Grundlagen
- ZVS
 - Aufbau und Beispiele
- ZCS
 - Aufbau und Beispiele
- Weitere Topologien
- Zusammenfassung

Weitere Topologien

- Unzureichende Lichtbogenspannung erfordert neue Elemente im Hybridschalter
- Einsatz eines „load commutation switch“ (LCS)
- Reihenschaltung des LCS mit dem mechanischen Schalter

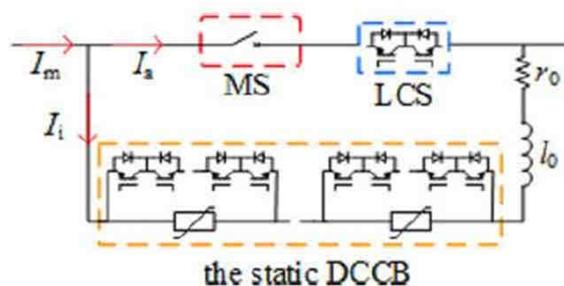


Weitere Topologien

- Schaltvorgang:
 - Einschalten des Kommutierungspfad (DCCB) und Abschalten des LCS
 - Abschalten des LCS generiert eine sehr hohe Spannung
 - Strom kommutiert aufgrund der hohen Spannungsdifferenz in sehr kurzer Zeit
 - Öffnen des Schalters MS ohne Lichtbogen

▪ Vorteile: Geringe Schäden an den Kontakten Hohe dielektrische Fertigkeit

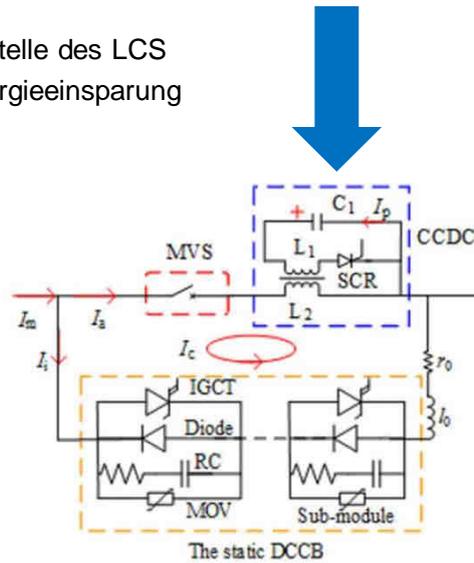
▪ Nachteile: Kosten Energieverbrauch



Weitere Topologien

Hybridschalter mit „current commutation drive circuit“ (CCDC)

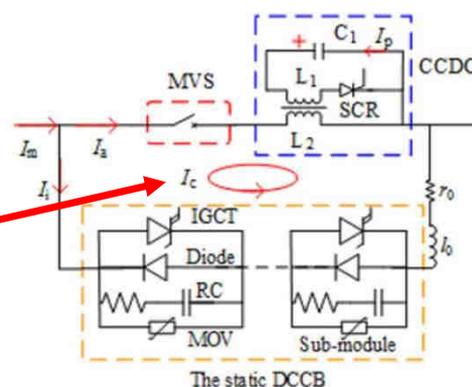
- Einsatz des CCDC anstelle des LCS
 - → Kosten – und Energieeinsparung



Weitere Topologien

Hybridschalter mit „current commutation drive circuit“ (CCDC)

- Aufbau:
 - Mechanischer Vakuumschalter (MVS) in Reihe mit der Wicklung L_2
 - Magnetische Kopplung von L_2 und L_1
 - L_1 in Reihe mit Thyristor (SCR) und C_1
- Schaltvorgang:
 - Anschalten des DCCB und des Thyristors
 - Induktion einer Spannung in L_2 und Entstehung eines Stroms I_c
 - Strom I_a durch MVS wird zu null gezwungen



Zusammenfassung

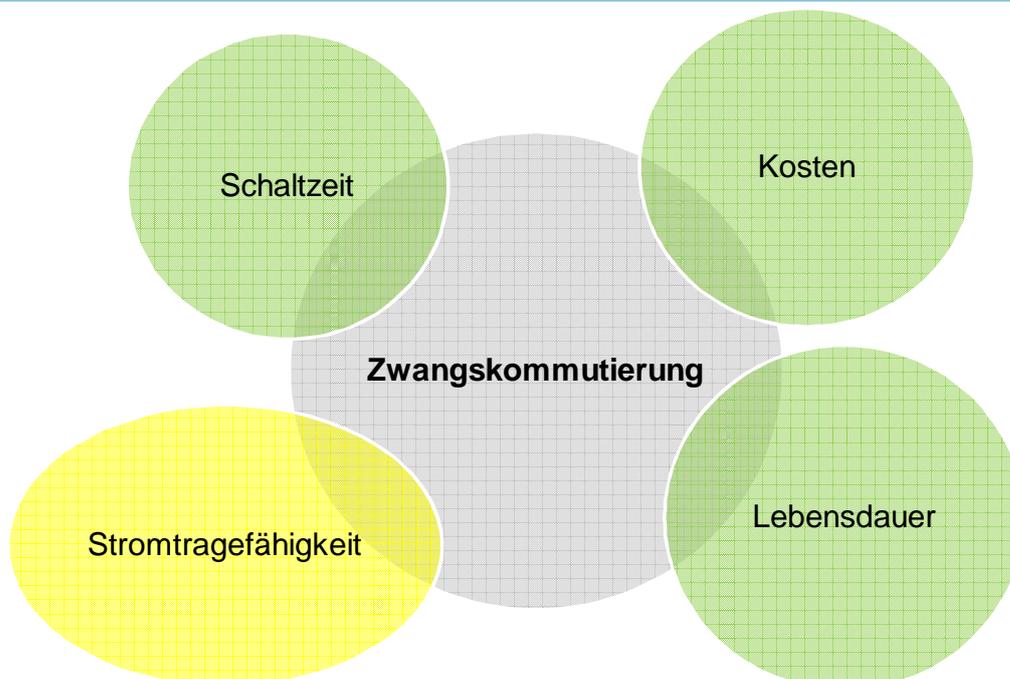
- Hybridschalter stellen eine gute Alternative für konventionelle Schalter dar!

Geringe Verluste	Relativ hohe Verluste und Kühlung
Hohe Stromtragefähigkeit	Niedrige Stromtragefähigkeit
Hohe Isolierung im geöffneten Zustand	Niedrige Isolierung im geöffneten Zustand
Langsames Schalten mit Lichtbogen	Schnelles, lichtbogenfreies Schalten
Verschleiß an den Kontakten	Geringe Wartungsarbeiten

- ZVS oder ZCS?

ZVS	ZCS
Kein Lichtbogen während des Anschaltprozesses	Größere Ströme bei geringerer Anzahl von Halbleitern
Keine großen Komponenten zur Gegenpulserzeugung	Mehr Freiheiten im Design des Hybridschalters

Zusammenfassung



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Quellen

- <http://images.vogel.de/vogelonline/bdb/997700/997735/26.jpg> (Zugriff 27.06.17 14:55 Uhr)
- https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/de/701011_BB_00_FB/kippschalter-250-vac-15-a-1-x-ausein-sci-r13-2-05-rastend-1-st.jpg?x=520&y=520 (Zugriff 01.07 14:14 Uhr)
- https://t3.ftcdn.net/jpg/00/68/41/70/500_F_68417024_AGLGdz7721uQjFbINq34fUXyQcmWvZEw.jpg (Zugriff 01.07 14:37 Uhr)
- https://image.freepik.com/freie-ikonen/schiff_318-27172.jpg (Zugriff 01.07 14:39)
- http://icon-icons.com/icons2/933/PNG/512/black-plane_icon-icons.com_72856.png (Zugriff 01.07 14:41 Uhr)

Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulgestaltung

Yu Zhang

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig,

augustin3568@hotmail.com

Kurzfassung

Die Technik im Elektrofahrzeug hat sich in den letzten Jahrzehnten stark entwickelt. Die Traktionsbatterie als Energiespeicher ist die einflussreichste Komponente im Fahrzeug. Der Aufbau von Traktionsbatterien stellt sich derzeit als komplexe Produktarchitektur aus mehreren 1000 Bauteilen dar. Um die Komplexität zu reduzieren, werden Gruppen von Batteriezellen vormontiert und als Einheit/Modul in das System eingesetzt. Diese Batteriemodule müssen zur Herstellung der Funktionsfähigkeit des Systems elektrisch miteinander verbunden werden.

Abstract

The technology in the electric vehicle has developed strongly in recent decades. The traction batteries as energy storage is the most influential component in the vehicle. The construction of traction batteries is currently a complex product architecture consisting of several 1000 components. To reduce complexity, groups of battery cells are preassembled and used as a unit / module in the system. These battery modules must be electrically connected to one another in order to produce the functionality of the system.

1 Einleitung

Für die Verbindung der Module werden zwei Arten an Leitungstypen verwendet, HV-Verbindung (elektrische Leistung) und LV-Verbindung (Kommunikation). Das Design, die Werkstoffwahl und das Fertigungsverfahren der HV-Verbindungen beeinflusst im Wesentlichen die Stromtragfähigkeit, die übertragbare elektrische Leistung und die Aufwände in der Systemmontage (Kosten). Eine Optimierung des HV- und LV-Leitungssystems in den frühen Entwicklungsphasen von Traktionsbatterien kann dazu führen, dass Kosten durch Fehlerfortpflanzung reduziert und die effektive Systemleistung angehoben werden. Im Folgenden wird der Stand der Technik aufgezeigt zu „Leitungssysteme in Traktionsbatterien“. Welche unterschiedlichen Routen der Leitungsverlegung können bei einem vorgegebenen Bauraum und fester Modulgröße gewählt werden und worauf dabei zu achten ist? Zu beachten sind z.B.: Minimierung der zurückgelegten Wegstrecke durch das System, Minimierung der individuellen Leitungslängen zwischen Modulen, Minimierung von Varianten (Maximierung von Gleichteilen), Minimierung Ohm'scher Verluste (Material, Querschnitt, Leitungsart und Leitungslänge), Minimierung der Leitungsisolation und Ummantelung, Minimierung der Anzahl an Biegeoperationen je Leitung

(Design for Manufacturing), Minimierung des Biegeradius, und vieles mehr. Ein Lösungsansatz wäre z.B. über den Ansatz des „Travelling Salesman Problems“ (TSP).

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Travelling Salesman Problem (TSP)

Traveling Salesman Problem (TSP) ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem des Operations Research und der theoretischen Informatik. Das Ziel besteht darin, eine kürzeste Route zwischen mehreren Städten zu finden, wobei jede Stadt genau einmal besucht wird und am Ende zu der Startstadt zurückgekehrt werden muss.

Das Traveling Salesman Problem gibt es in seiner Reinform in vielen praktischen Anwendungen beispielsweise der Planung von Touren. Noch häufiger wird die Methode beim Verteilen von Waren oder Paketen eingesetzt.

„Stadt“ repräsentiert hier ein Batteriemodul. In diesem sind 70 Zellen (Zellentypen Panasonic NRC 21700) pro Modul verbaut, während „Entfernung“ für Leitungslängen zwischen Modulen oder der Wegstrecke durch das System oder den Ohm'schen Verlusten steht.

Mathematische Darstellung des TSPs

Als Graph Modellierung

Das Problem des TSPs modelliert anschaulich durch Knoten und Kanten eines Graphen. Dabei gelten die Knoten (im Bild: A bis D) als die Städte, jede Kante (a,d) stellt sich zwischen zwei Knoten a und d zusammen mit Länge $C_{ad} \geq 0$ als graphische Länge einer Verbindung dar. Die Länge wird als Reisezeit oder als Kosten einer Reise zwischen zwei Städten interpretiert. Hier wird Leitungslänge repräsentiert. Eine Tour ist ein Kreis in diesem Graphen, der jeden Knoten genau einmal zählt. Ziel ist es, eine kürzeste Tour zu finden.

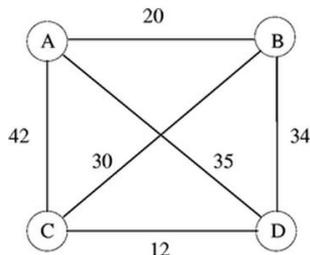


Abbildung 1: TSP auf 4 Knoten

Nach Eigenschaften der Kantengewichte werden hier das symmetrische und das metrische TSP aufgestellt.

Symmetrische TSP:

Asymmetrischen TSP können die Kanten in beide Richtungen unterschiedliche Länge haben, modelliert werden mit Hilfe eines gerichteten Graphen.

Beim symmetrischen TSP sind die Kantenlängen in beide Richtungen identisch, es gilt $C_{ad}=C_{da}$. Jede Tour in beide Richtungen hat gleiche Länge. Die Symmetrie vereinfacht das TSP. Ein symmetrisches TSP wird üblicherweise mit Hilfe eines ungerichteten Graphen modelliert. Im realen Fall kann Städten asymmetrisch oder symmetrisch sein, zum Beispiel es Baustellen oder Einbahnstraßen zwischen Städten gibt.

Metrisches TSP

Ein symmetrisches TSP heißt metrisch, wenn zusätzlich seine Kantenlängen die Dreiecksungleichung erfüllen:

$$C_{ad} \leq C_{ab} + C_{bd}$$

Umwege lohnen sich nicht, weil der Weg von a nach d nicht länger ist als die Verbindung von a nach d über einen dritten Knoten b. [1]

Als ganzzahliges lineares Programm Modellierung

Hier Modellierung für das symmetrische TSP mit Knotenmenge V vorgestellt werden. Für jede Kante $\{i,j\}$ wird eine binäre Variable $X_{ij} \in \{0,1\}$ eingeführt, die für eine gegebene Tour angibt,

ob die Kante $\{i,j\}$ in dieser Tour enthalten

ist ($X_{ij}=1$) oder nicht ($X_{ij}=0$).

Ziel ist es, unter allen Touren eine kürzeste zu finden: [1]

$$\min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \mid x \text{ definiert eine Tour} \right\}$$

2.2 Bauraum

Es gibt für jedes Modul 70 Zellen. Das Bild sieht wie unten aus.

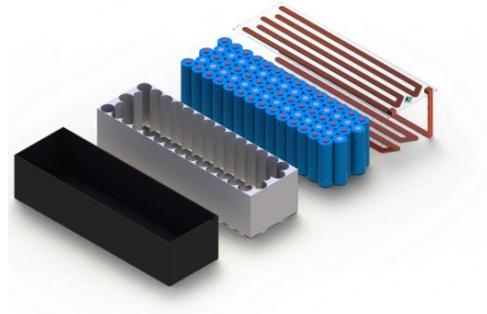


Abbildung 2: Explosionszeichnung eines Batteriemoduls

Wenn man die 70 Batteriezellen (Typ Panasonic NRC 21700) im Modul verbaut, sieht es wie in Abbildung 2 aus.

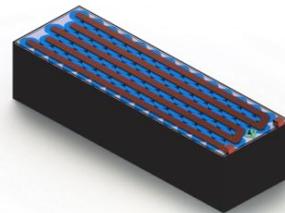
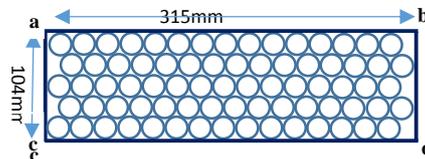


Abbildung 3: Gesamtes Batteriemodul

Die Seitenlängen des Moduls werden wie folgt ermittelt:



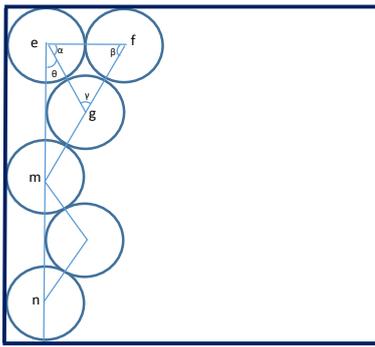


Abbildung 4: Modulbemaßung

$$\alpha = \beta = \gamma = 60^\circ$$

$$ef = fg = eg = 21 \text{ mm}$$

$$\theta = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$$

$$em = mn = 2 \cdot eg \cdot \cos \theta = 36.4 \text{ mm}$$

$$ac = 10 \text{ mm} + 21 \text{ mm} + 36.4 \text{ mm} \times 2 \approx 104 \text{ mm}$$

Analog

$$ab = 315 \text{ mm}$$

$$\text{Kante } ab = 315 \text{ mm}$$

$$\text{Kante } ac = 104 \text{ mm}$$

$$\text{Kante } ah = 90 \text{ mm}$$

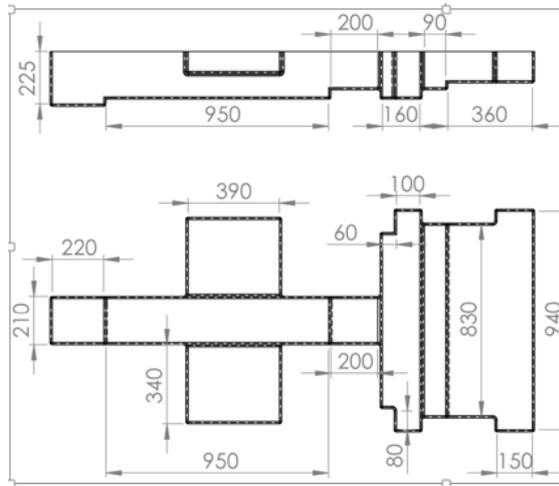


Abbildung 5: bemaßtes Batteriesystemgehäuse für den Bauraum der Batteriemodule

Die Batteriemodule werden wie in Abbildung 5 im Bauraum angeordnet.

Es kann maximal 26 stücke Batteriemodule eingeführt.

Maßstäbliche Bildarstellung sieht wie unten aus:

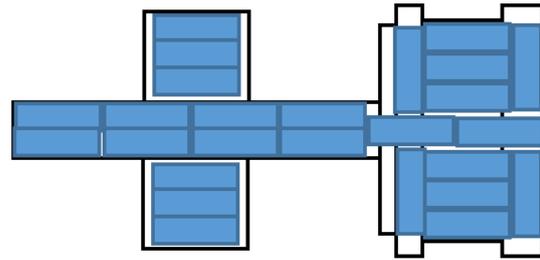


Abbildung 6: Batteriesystem mit Batteriemodulanordnung

Die Fläche der Batteriemodule beträgt:

$$S_{Bm} = 26 \times 315 \text{ mm} \times 104 \text{ mm} = 851760 \text{ mm}^2$$

Die gesamte Bauraumfläche des Systemgehäuses beträgt:

$$\begin{aligned} S_{Br} &= 210 \text{ mm} \times 1370 \text{ mm} + 2 \times 340 \text{ mm} \times \\ &\quad 390 \text{ mm} + 80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 + \\ &\quad 160 \text{ mm} \times 780 \text{ mm} + 830 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} + \\ &\quad 110 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \\ &= 1083700 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Damit beträgt die Bauraumausnutzung:

$$\begin{aligned} \eta &= S_{Bm} / S_{Br} \\ &= 851760 \text{ mm}^2 / 1083700 \text{ mm}^2 \\ &= 78.6 \% \end{aligned}$$

2.3 Ohm'sche Verluste

Der Widerstand der Leitungen wird durch folgende Formel berechnet: [2]

$$R = \rho \times l / A$$

ρ = spezifischen Widerstand (für Kupfer 0,0178 Ωm)

l = Länge (in Meter)

A = Querschnittsfläche

Die Querschnittsfläche A berechnet sich für runde Leitungen mit dem Durchmesser d nach der Formel:

$$A = \pi \times d^2 / 4 \quad (\pi = 3.1415)$$

Die Verlustleistung (Watt) nach dem Ohmschen Gesetz

$$P = R \times I^2$$

P = Verlustleistung (Watt)

R = Widerstand der Leitungen

I = angenommene Strombelastung (Ampere)

3 Verlegung der Leitungen

zwischen Batteriemodulen in

einem vorgegebenen

Bauraum

Es wird zu viele Möglichkeiten wie die beide Elektroden, kennzeichnet als Kathode und Anode, im Bauraum verlegt werden können. Hier wird nur 4 Möglichkeiten der Verlegung der Elektroden in Betracht gezogen.

1. Möglichkeit der Elektrodenverlegung:

Bei horizontalen Batteriemodulen liegt die Elektroden auf linke Seite; Bei senkrechten Batteriemodulen liegt die Elektroden auf obere Seite

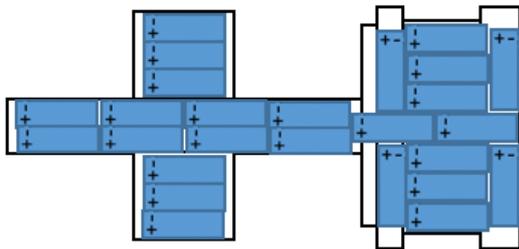


Abbildung 7: Kontaktanordnung der Möglichkeit 1.

Hier wird auch 4 Möglichkeiten der Bindung der Leitungen in Betracht gezogen:

1.1 Möglichkeit :

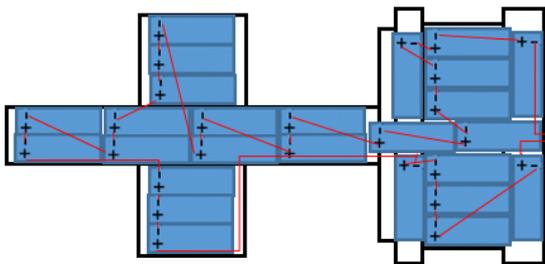


Abbildung 8: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 1.1

Die Leitungslänge beträgt:

Mit 11 Leitungslänge von 30mm: $11 \times 30 = 330\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 330mm: $1 \times 330\text{mm} = 330\text{mm}$
 Mit 2 Leitungslänge von 105mm: $2 \times 105\text{mm} = 310\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 165mm: $1 \times 165\text{mm} = 165\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 104mm: $1 \times 104\text{mm} = 104\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 332mm: $1 \times 332\text{mm} = 332\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 360mm: $1 \times 360\text{mm} = 360\text{mm}$
 Mit 2 Leitungslänge von 375mm: $2 \times 375\text{mm} = 375\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 555mm: $1 \times 555\text{mm} = 555\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 170mm: $1 \times 170\text{mm} = 170\text{mm}$
 Mit 1 Leitungslänge von 495mm: $1 \times 495\text{mm} = 495\text{mm}$

Mit 1 Leitungslänge von 1335mm: $1 \times 1335\text{mm} = 1335\text{mm}$

Mit 1 Leitungslänge von 525mm: $1 \times 525\text{mm} = 525\text{mm}$

Mit 1 Leitungslänge von 367mm: $1 \times 367\text{mm} = 367\text{mm}$

Mit 1 Leitungslänge von 156mm: $1 \times 156\text{mm} = 156\text{mm}$

Es gibt 11 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 2
 Leitungen mit Leitungslänge von 310mm; 2
 Leitungen mit Leitungslänge von 375mm; Sonst
 sind 12 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen
 Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5909mm

1.2 Möglichkeit

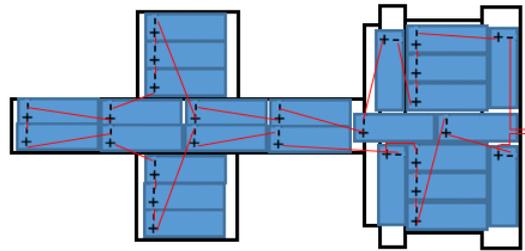


Abbildung 9: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 1.2

Analog zu 1.1

Es gibt 9 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm;
 5 Leitungen mit Leitungslänge von 330mm; 2
 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 2
 Leitungen mit Leitungslänge von 450mm; 2
 Leitungen mit Leitungslänge von 180mm; Sonst
 sind 7 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen
 Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6118mm

1.3 Möglichkeit

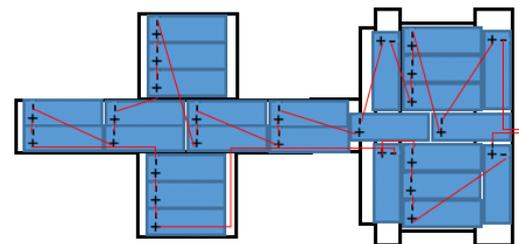


Abbildung 10: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 1.3

Es gibt 12 Leitungen mit Leitungslänge von
 30mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von
 375mm; Sonst sind 13 Einzel Leitungslänge mit
 unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6692mm

1.4 Möglichkeit

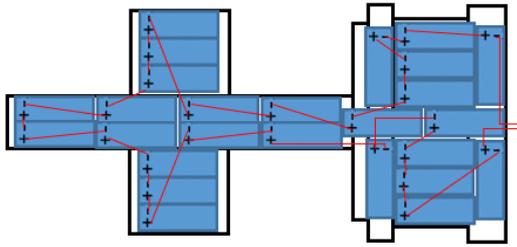


Abbildung 11: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 1.4

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 5 Leitungen mit Leitungslänge von 330mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 180mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 450mm; Sonst sind 10 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5968mm

Mit die 4 unterschiedlichen Ergebnisse von vier Möglichkeiten, wird schon bekannt gegeben, dass Möglichkeit 1.1 wenige Leitungslänge braucht. Darüber hinaus ist Möglichkeit 1.2 die beste Auswahl wenn von Gleichteilen in Betrachtung genommen wird.

2. Möglichkeit der Elektroden: Bei horizontalen Batteriemodulen→ linke Seite; Bei senkrechten Batteriemodulen→ untere Seite

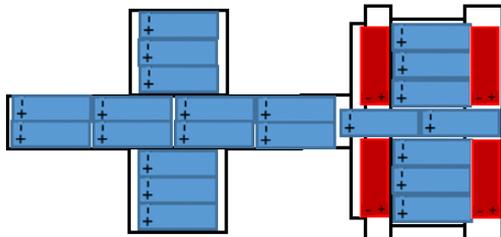


Abbildung 12: Kontaktanordnung der Möglichkeit 2.

2.1 Möglichkeit

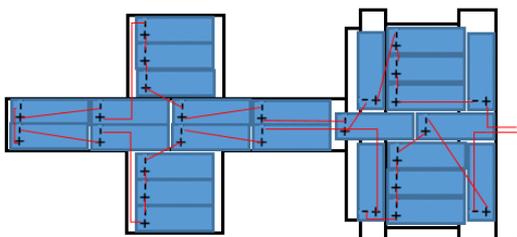


Abbildung 13: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 2.1

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 3 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 3 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 600mm; Sonst sind 7 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6412mm

2.2 Möglichkeit

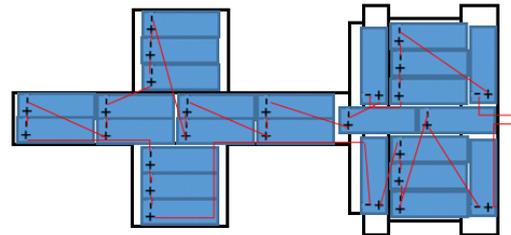


Abbildung 14: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 2.2

Es gibt 12 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 360mm; Sonst sind 13 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6749mm

2.3 Möglichkeit

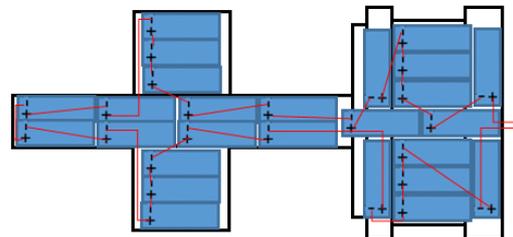


Abbildung 15: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 2.3

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 3 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 600mm; Sonst sind 8 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6306mm

2.4 Möglichkeit

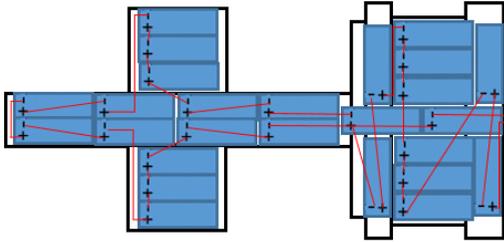


Abbildung 16: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 2.4

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 3 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 450mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 600mm; Sonst sind 6 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.

Die gesamte Leitungslänge beträgt: 7182mm
Mit die 4 unterschiedlichen Ergebnisse von vier Möglichkeiten, wird schon bekannt gegeben, dass Möglichkeit 2.2 wenige Leitungslänge braucht. Darüber hinaus ist Möglichkeit 2.4 die beste Auswahl wenn von Gleichteilen in Betrachtung genommen wird.

3. Möglichkeit der Elektroden: Bei horizontalen Batteriemodulen → rechte Seite; Bei senkrechten Batteriemodulen → obere Seite

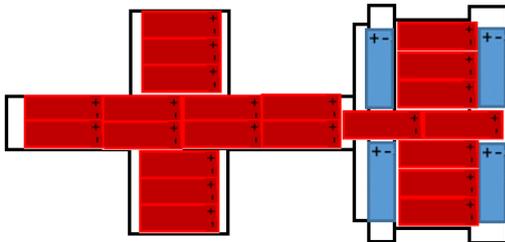


Abbildung 17: Kontaktanordnung der Möglichkeit 3.

4 Möglichkeiten der Bindung der Leitungen in Betracht gezogen:

3.1 Möglichkeit :

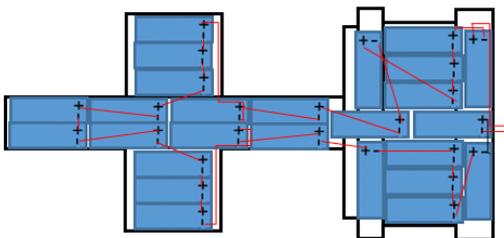


Abbildung 18: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 3.1

Es gibt 9 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 5 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 180mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 105mm; Sonst sind 7 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5911mm

3.2 Möglichkeit :

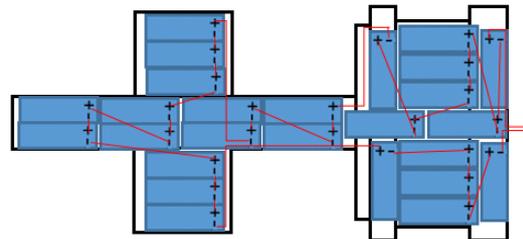


Abbildung 19: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 3.2

Es gibt 12 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 450mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 300mm; Sonst sind 9 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6164mm

3.3 Möglichkeit :

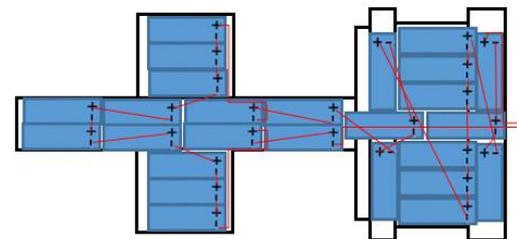


Abbildung 20: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 3.3

Es gibt 9 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 5 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 105mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 180mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 570mm; Sonst

sind 7 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6557mm

3.4 Möglichkeit

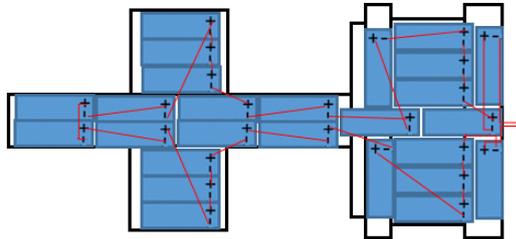


Abbildung 21: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 3.4

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 495mm; Sonst sind 11 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6179mm

Mit die 4 unterschiedlichen Ergebnisse von vier Möglichkeiten, wird schon bekannt gegeben, dass Möglichkeit 3.1 wenige Leitungslänge braucht. Darüber hinaus ist Möglichkeit 3.1 auch die beste Auswahl wenn von Gleichteilen in Betrachtung genommen wird.

4. Möglichkeit der Elektroden: Bei horizontalen Batteriemodulen → rechte Seite; Bei senkrechten Batteriemodulen → untere Seite.

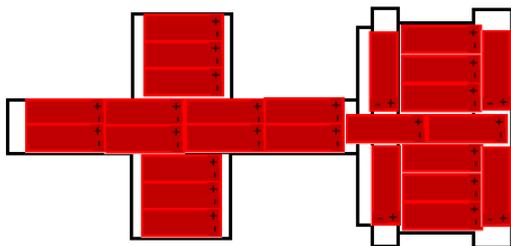


Abbildung 22: Kontaktanordnung der Möglichkeit 4.

4.1 Möglichkeit

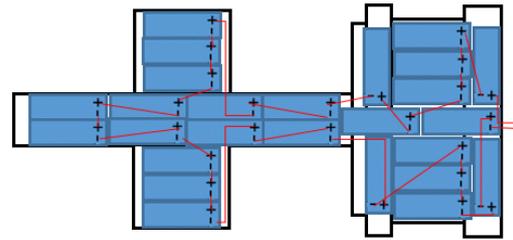


Abbildung 23: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 4.1

Es gibt 9 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 570mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 180mm; Sonst sind 9 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5602mm

4.2 Möglichkeit

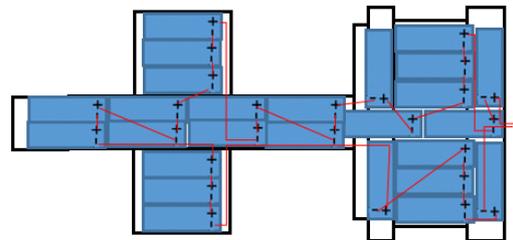


Abbildung 24: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 4.2

Es gibt 12 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 375mm; Sonst sind 13 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5917mm

4.3 Möglichkeit

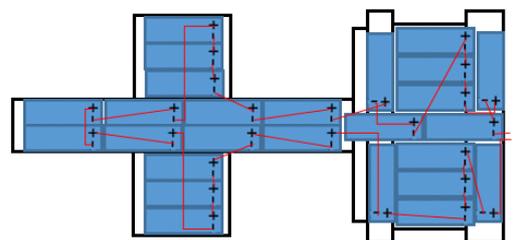


Abbildung 25: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 4.3

Es gibt 8 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 225mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 105mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 585mm; 2

Leitungen mit Leitungslänge von 315mm; Sonst sind 4 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6100mm

4.4 Möglichkeit

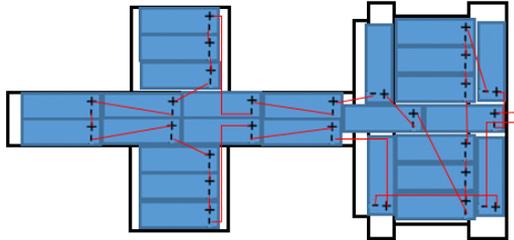


Abbildung 26: Leitungsverlegung der Kontaktanordnung 4.4

Es gibt 9 Leitungen mit Leitungslänge von 30mm; 4 Leitungen mit Leitungslänge von 345mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 585mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 150mm; 2 Leitungen mit Leitungslänge von 105mm; Sonst sind 8 Einzel Leitungslänge mit unterschiedlichen Leitungslänge.
Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6014mm

Mit die 4 unterschiedlichen Ergebnisse von vier Möglichkeiten, wird schon bekannt gegeben, dass Möglichkeit 4.1 wenige Leitungslänge braucht. Darüber hinaus ist Möglichkeit 4.3 die beste Auswahl wenn von Gleichteilen in Betracht genommen wird.

4 Optimierung

4.1 1. Optimierung: Minimierung der zurückgelegten Wegstrecke durch das System und Ohm'sche Verluste

Die beste Verlegung der Leitungen von 16 Variablen der 1.Optimierung ist die Möglichkeit 4.1

4.2 2. Optimierung: Minimierung der individuellen Leitungslängen zwischen Modulen und der Anzahl an Biegeoperationen je Leitung (Design for Manufacturing) darüber hinaus Minimierung von Varianten (Maximierung von Gleichteilen)

Die beste Verlegung der Leitungen von 16 Variablen der 2.Optimierung ist die Möglichkeit 4.3.

5 Literatur

- [1] „Problem des Handlungsreisenden“ [Online]. Available: http://www.mathepedia.de/Problem_des_Handlungsreisenden.aspx. [Zugriff am 20.05.2017].
- [2] elweb „Widerstand“ [Online]. Available: <http://elweb.info/dokuwiki/doku.php?id=widerstand>. [Zugriff am 20.05.2017].



Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulgestaltung

Yu, Zhang, 05.07.2017

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im Bauraum
 - Möglichkeit der Elektrodenverlegung
 - 1. Möglichkeit
 - 2. Möglichkeit
 - 3. Möglichkeit
 - 4. Möglichkeit
- Zusammenfassung

Agenda

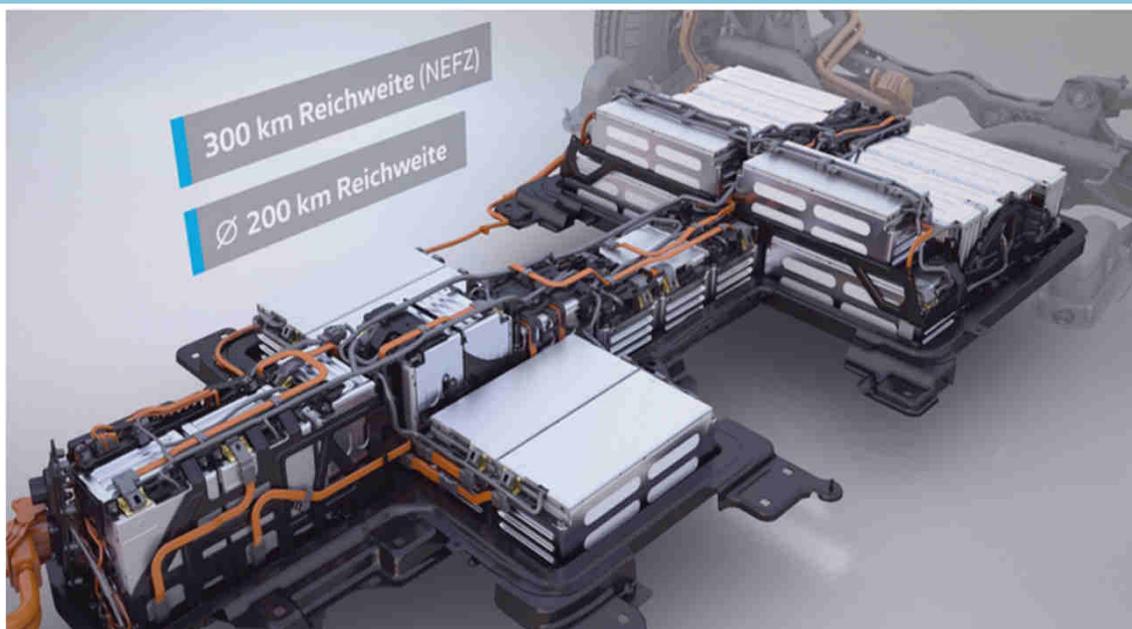
- Einleitung
- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im Bauraum
 - Möglichkeit der Elektrodenverlegung
 - 1. Möglichkeit
 - 2. Möglichkeit
 - 3. Möglichkeit
 - 4. Möglichkeit
- Zusammenfassung



05.07.2017 | Yu Zhang | Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulgestaltung | Seite 3



Einleitung



Quelle 1



05.07.2017 | Yu Zhang | Möglichkeiten der Topologie-flexiblen Batteriemodulgestaltung | Seite 4



Einleitung



Agenda

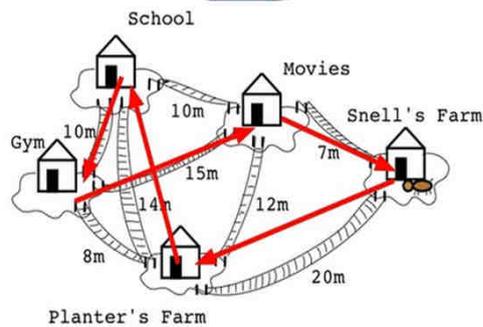
- Einleitung
- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im Bauraum
 - Möglichkeit der Elektrodenverlegung
 - 1. Möglichkeit
 - 2. Möglichkeit
 - 3. Möglichkeit
 - 4. Möglichkeit
- Zusammenfassung

Grundlagen – Travelling Salesman Problem (TSP)



ein kombinatorisches Optimierungsproblem

Die Ziel besteht darin, eine kürzeste Route zwischen mehrere Städten zu finden, die jede Stadt genau einmal besucht und am Ende zu der Startstadt zurückkehren.



Hier werden die „Städte“ für jeweils ein Batteriemodul repräsentiert, während „Entfernung“ für Leitungslängen zwischen Modulen steht.

Quelle 2

Grundlagen – Travelling Salesman Problem (TSP)

Mathematische Darstellung des TSPs

Modellierung als Graph

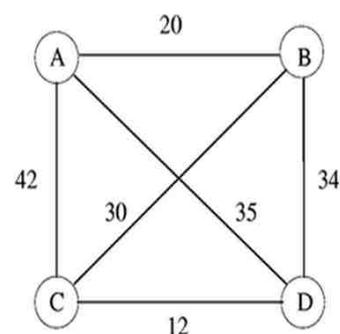
Symmetrische TSP

$$C_{ad} = C_{da}$$

Metrisches TSP

Erfüllung der Dreiecksgleichung:

$$C_{ad} < C_{ab} + C_{bd}$$



Grundlagen – Travelling Salesman Problem (TSP)

Mathematische Darstellung des TSPs

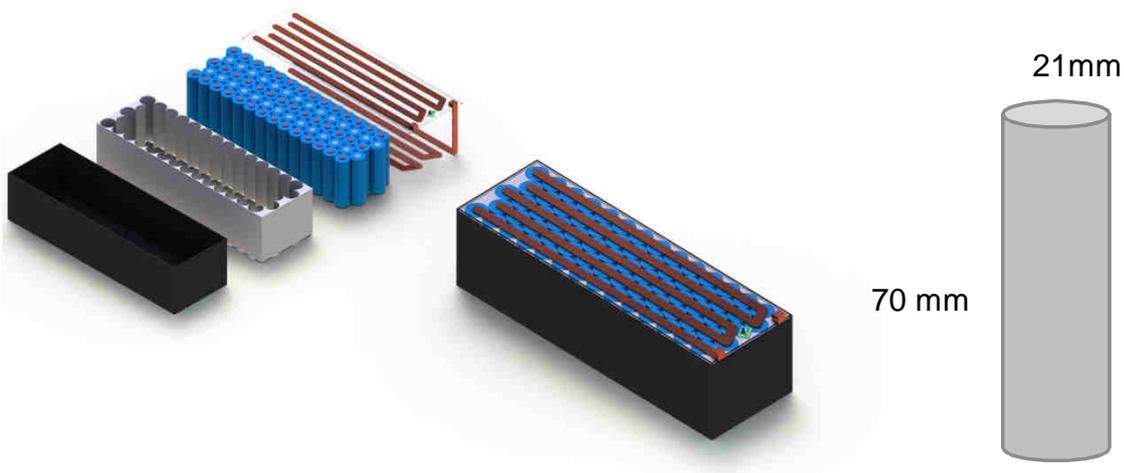
Modellierung als ganzzahliges lineares Programm

Knotenmenge V

$(x_{ad}=1)$ oder $(x_{ad}=0)$.

$$\min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} c_{ij} x_{ij} \mid x \text{ definiert eine Tour} \right\}$$

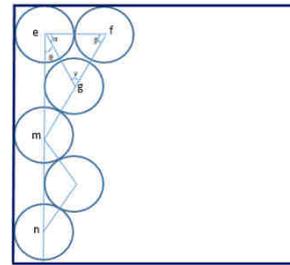
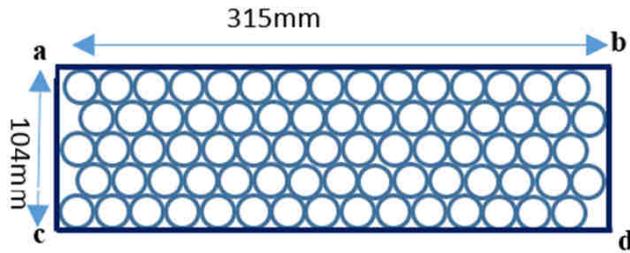
Grundlagen – Bauraum



Jedes Modul hat 70 Batteriezellen

Die Batteriezellen könnten vom Typ Panasonic NRC 21700 sein

Grundlagen – Bauraum



$$\alpha = \beta = \gamma = 60^\circ$$

$$ef = fg = eg = 21\text{mm}$$

$$\theta = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$$

$$em = mn = 2 * eg * \cos \theta = 36.4\text{mm}$$

$$ac = 10\text{mm} + 21\text{mm} + 36.4\text{mm} \times 2 \approx 104\text{mm}$$

Analog zu ac ist

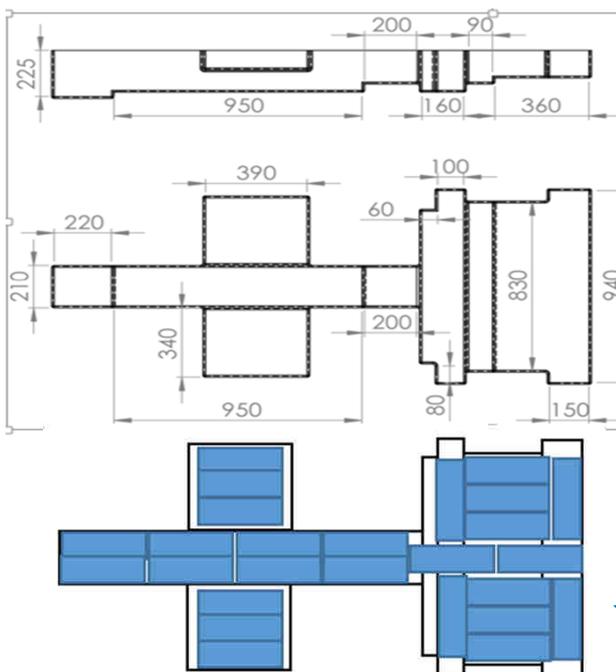
$$ab = 315\text{mm}$$

Für jedes Batteriemodul:

Kante **ab=315 mm**

Kante **ac=104 mm**

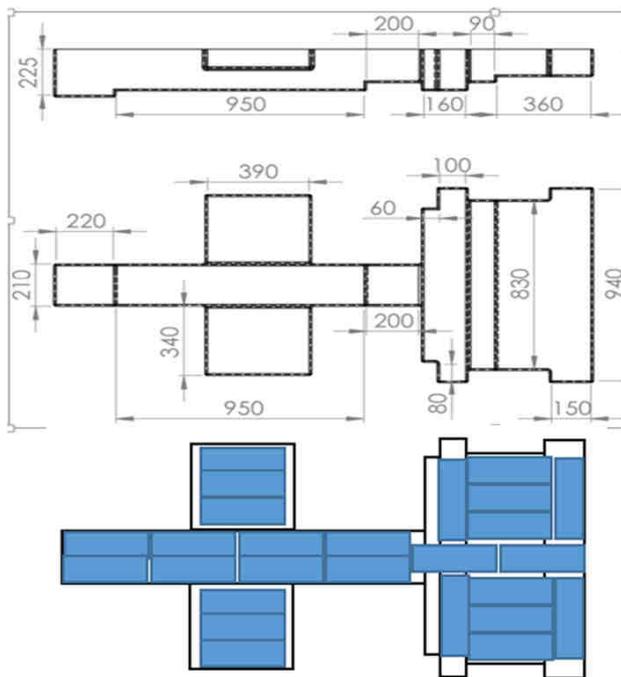
Grundlagen – Bauraum



Es können maximal 26
Batteriemodule insgesamt 1820
Batteriezellen im Systemgehäuse
verbaut werden

← Maßstabsgetreue Darstellung

Grundlagen – Bauraum



Die von Fläche der Batteriemodule eingeführte Fläche beträgt:

$$S_{Bm} = 851760 \text{ mm}^2$$

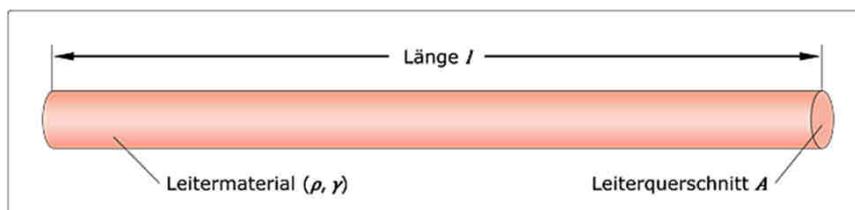
Die gesamte Bauraumfläche des Systemgehäuses beträgt:

$$S_{Br} = 1083700 \text{ mm}^2$$

Der Anteil der eingeführten Batteriemodule aus der gesamten Bauraumfläche beträgt. Damit beträgt die Bauraumausnutzung:

$$\begin{aligned} \eta &= S_{Bm} / S_{Br} \\ &= 851760 \text{ mm}^2 / 1083700 \text{ mm}^2 \\ &= 78.6 \% \end{aligned}$$

Grundlagen – Ohm'sche Verluste



Quelle 3

Der Widerstand der Leitungen: $R = \rho \times l / A$

Mit ρ = spezifischen Widerstand (für Kupfer 0,0178 Ωm)

l = Länge (in Meter)

A = Querschnittsfläche des Leiters

Die Verlustleistung (Watt) nach dem Ohmschen Gesetz: $P = R \times I^2$

Mit P = Verlustleistung (Watt)

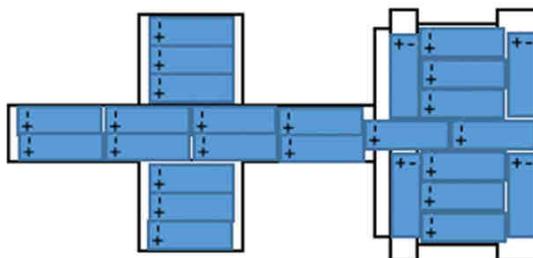
R = Widerstand der Leitungen

I = angenommene Strombelastung (Ampere)

Agenda

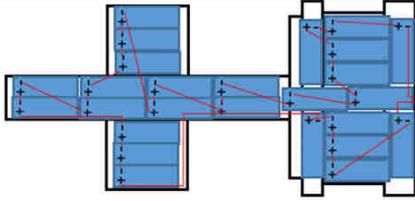
- Einleitung
- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im Bauraum
 - Möglichkeit der Elektrodenverlegung
 - 1. Möglichkeit
 - 2. Möglichkeit
 - 3. Möglichkeit
 - 4. Möglichkeit
- Zusammenfassung

Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 1.Möglichkeit

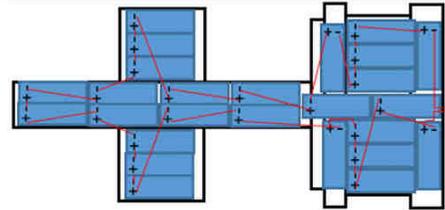


Bei horizontalen Batteriemodulen liegen die Kontakte auf der linken Seite;
Bei senkrechten Batteriemodulen liegen die Kontakte auf der oberen Seite.

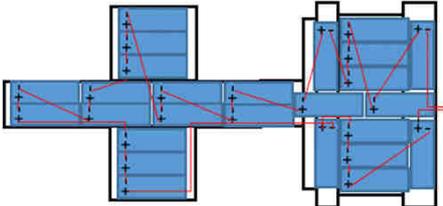
Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 1.Möglichkeit



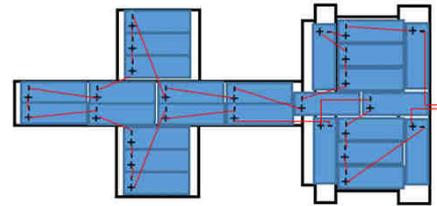
1.1 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
5909mm
Anzahl der Gleichteile: 15
Anzahl Einzelstücke: 12



1.2 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6118mm
Anzahl der Gleichteile: 20
Anzahl Einzelstücke: 7

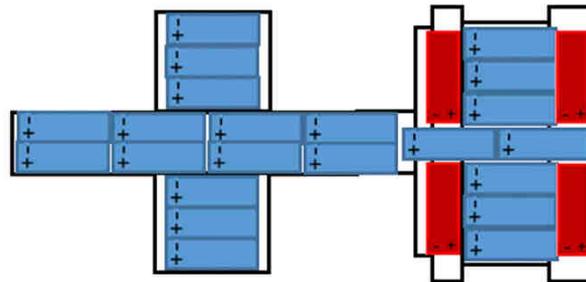


1.3 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6692mm
Anzahl der Gleichteile: 14
Anzahl Einzelstücke: 13



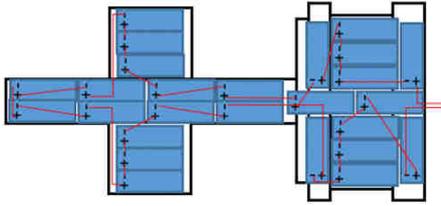
1.4 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
5968mm
Anzahl der Gleichteile: 17
Anzahl Einzelstücke: 10

Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 2.Möglichkeit

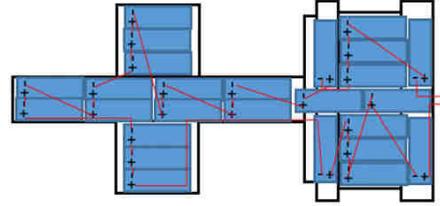


Bei horizontalen Batteriemodulen liegt die Kontakte auf linke Seite;
Bei senkrechten Batteriemodulen liegt die Kontakte auf untere Seite.

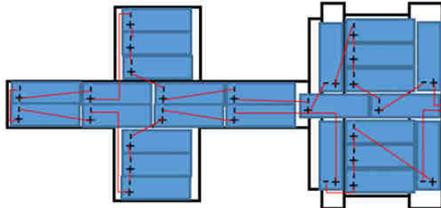
Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 2.Möglichkeit



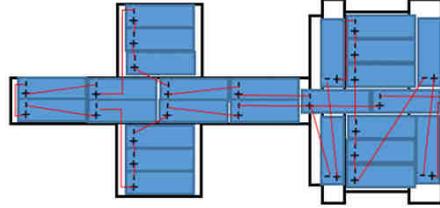
2.1 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6412mm
Anzahl der Gleichteile: 20
Anzahl Einzelstücke: 7



2.2 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6749mm
Anzahl der Gleichteile: 14
Anzahl Einzelstücke: 13

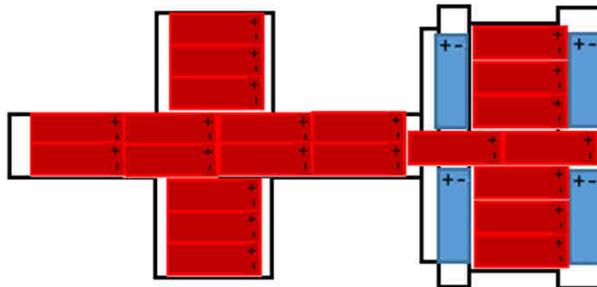


2.3 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6306mm
Anzahl der Gleichteile: 19
Anzahl Einzelstücke: 8



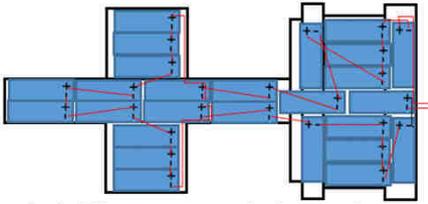
2.4 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
7182mm
Anzahl der Gleichteile: 21
Anzahl Einzelstücke: 6

Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 3.Möglichkeit

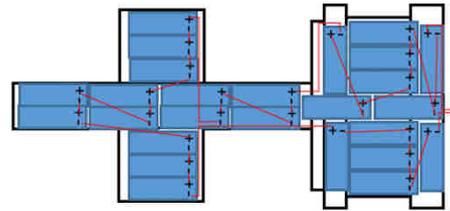


Bei horizontalen Batteriemodulen liegt die Kontakte auf rechte Seite;
Bei senkrechten Batteriemodulen liegt die Kontakte auf obere Seite.

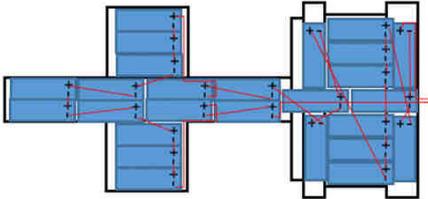
Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 3.Möglichkeit



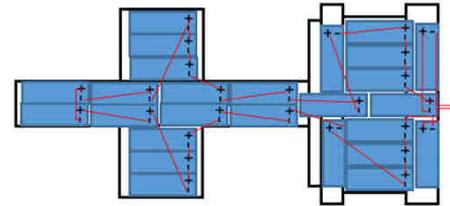
3.1 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
5911mm
Anzahl der Gleichteile: 20
Anzahl Einzelstücke: 7



3.2 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6164mm
Anzahl der Gleichteile: 18
Anzahl Einzelstücke: 9

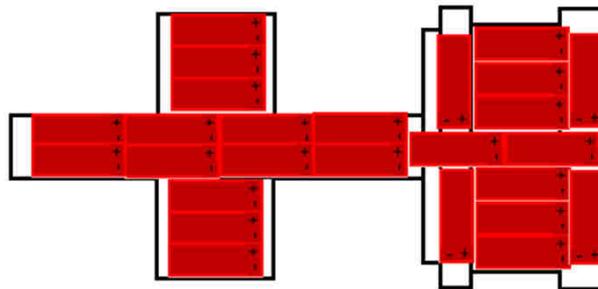


3.3 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6557mm
Anzahl der Gleichteile: 20
Anzahl Einzelstücke: 7



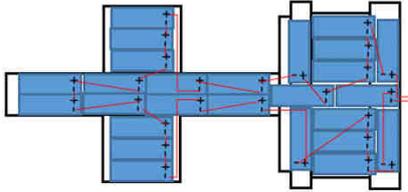
3.4 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6179mm
Anzahl der Gleichteile: 16
Anzahl Einzelstücke: 11

Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 4.Möglichkeit

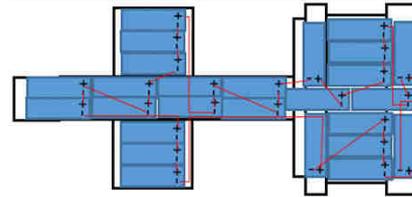


Bei horizontalen Batteriemodulen liegt die Kontakte auf rechte Seite;
Bei senkrechten Batteriemodulen liegt die Kontakte auf untere Seite.

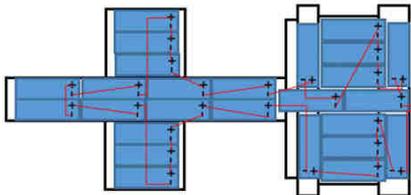
Möglichkeiten der Kontaktanordnung – 4.Möglichkeit



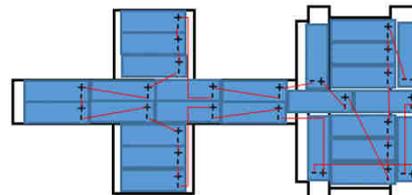
4.1 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
5602mm
Anzahl der Gleichteile: 17
Anzahl Einzelstücke: 10



4.2 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
5917mm
Anzahl der Gleichteile: 14
Anzahl Einzelstücke: 13



4.3 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6100mm
Anzahl der Gleichteile: 22
Anzahl Einzelstücke: 5



4.4 Die gesamte Leitungslänge beträgt:
6014mm
Anzahl der Gleichteile: 19
Anzahl Einzelstücke: 8

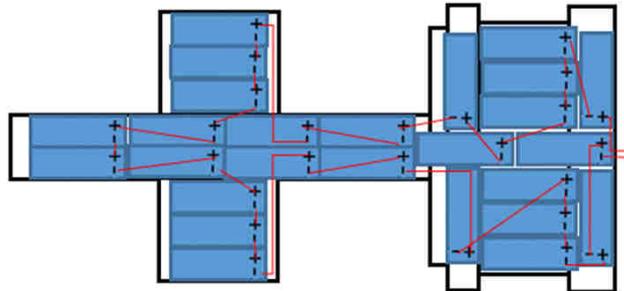
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im Bauraum
 - Möglichkeit der Elektrodenverlegung
 - 1. Möglichkeit
 - 2. Möglichkeit
 - 3. Möglichkeit
 - 4. Möglichkeit
- Zusammenfassung

Zusammenfassung der Ergebnisse

- **1.Optimierung: Minimierung der zurückgelegten Wegstrecke durch das System und Ohm'sche Verluste**

Die beste Verlegung der Leitungen von 16 Variablen der 1.Optimierung ist die Möglichkeit 4.1 (Der Ohm'sche Verluste ist proportional zu Leitungslänge)

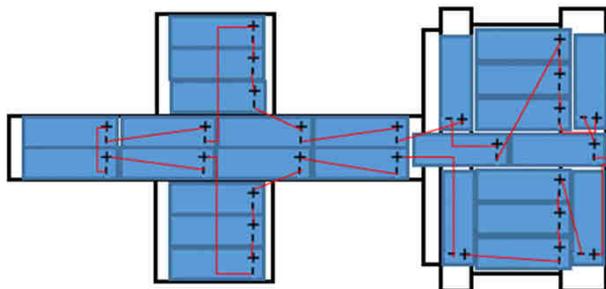


Die gesamte Leitungslänge beträgt: 5602mm
Anzahl der Gleichteile: 17
Anzahl Einzelstücke: 10

Zusammenfassung der Ergebnisse

- **2.Optimierung: Minimierung der individuellen Leitungslängen zwischen Modulen und der Anzahl an Biegeoperationen je Leitung (Design for Manufacturing) darüber hinaus Minimierung von Varianten (Maximierung von Gleichteilen)**

Die beste Verlegung der Leitungen von 16 Variablen der 2.Optimierung ist die Möglichkeit 4.3.



Die gesamte Leitungslänge beträgt: 6100mm
Anzahl der Gleichteile: 22
Anzahl Einzelstücke: 5

Zusammenfassung des Vortrags

- Grundlagen
 - Travelling Salesman Problem(TSP)
 - Bauraum
 - Ohm'sche Verluste
- Hier wurden 16 Möglichkeiten der Verlegung der Leitungen zwischen Batteriemodule im vorgegebenen Bauraum aufgezeigt
- Optimierungsziele sind Leitungslänge und Anzahl der Gleichteile

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Quellen

- [1] Daniel Bönnighausen, „Stromer-Kompromiss: Neuer VW e-Golf im Fahrbericht“ 05. April 2017. [Online]. Available: <https://www.electrive.net/2017/04/05/stromer-kompromiss-neuer-vw-e-golf-im-fahrbericht/>
- [2] Meera Dolasia, „Scientists Learn How Bumblebees Solve Complex 'Traveling Salesman Problem' So Effortlessly“ 30. September 2012. [Online]. Available: <https://www.dogonews.com/2012/9/30/scientists-learn-how-bumblebees-solve-complex-traveling-salesman-problem-so-effortlessly> [Zugriff am 13.05.2017].
- [3] Gerhard Klähn, „Elektrische Grundgrößen“ 22. Dezember 2010. [Online]. Available: http://www.elektrotechnik-fachbuch.de/e_grundlagen_kap_04_4v5.html. [Zugriff am 13.05.2017].

Potentiale von Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen

Potentials of DC Power Supply Networks

Christoph Steinmann, B.Sc.

Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, c.steinmann@tu-bs.de

Kurzfassung

Der stetig zunehmende Anteil an regenerativer Energietechnik stellt die Netzbetreiber vor eine neue Herausforderung. Die fluktuierende Energieerzeugung sowie die oftmals hohe Energieerzeugung in geographisch schwach besiedelten Gebieten fordern einen Netzausbau. Zunehmende Gleichstromlasten und Gleichstromerzeuger im Energieversorgungsnetz führen zu der Überlegung, zusätzlich zu dem bestehenden AC-Netz weitere lokale Netze, sogenannte Microgrids auf DC-Basis, zu implementieren. Die Vor- und Nachteile der zusätzlichen Gleichstromnetze und deren Anwendungsfälle sollen in diesem Bericht gegenübergestellt werden.

Abstract

The steadily increasing share of regenerative energy technology poses a new challenge for grid operators. The fluctuating and often high generation of energy in geographic low populated areas requires a grid expansion. Increasing DC loads and DC producers in the power grid lead to the idea of implementing additional local networks, called microgrids, which are based on DC, in addition to the existing AC grid. The advantages and disadvantages of the additional microgrids and their Applications will be compared in this paper.

1 Einleitung

Dreiphasenwechselstrom ist bis heute der Standard in der weltweiten Energieversorgung. Die Einfachheit der Erzeugung im Kraftwerk über Drehfeldmaschinen sowie die energieeffiziente Transformierbarkeit auf verschiedenste Spannungsebenen zeichnen die wesentlichen Vorteile der Drehstromtechnik aus. Ein weiterer Vorteil sind die technisch einfacheren Schalthandlungen.

Durch den Wandel der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs in den letzten Jahrzehnten stellt sich die Frage, ob eine ausschließliche Versorgung mit Drehstrom und damit einhergehend ein ausschließliches Drehstromversorgungsnetz in der heutigen Zeit noch wirtschaftlich ist. Der aktuelle Wandel fordert eine Umstrukturierung der Energieversorgungsnetze und es ist zu untersuchen inwieweit zusätzliche Gleichstromnetze dabei behilflich sein können.

2 Theoretische Grundlagen

Seit Beginn der elektrischen Energieversorgung haben sich die Verbraucher in den Haushalten, der Industrie und in der öffentlichen Infrastruktur stark verändert. So wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts der größte Teil der elektrischen Energie zur Beleuchtung verbraucht [1].

Heute, wo jeder Haushalt Konsumelektronik besitzt, wird mehr als ein Viertel der elektrischen Energie für die Unterhaltungs- und Informationstechnik benötigt [2]. Abbildung 1 zeigt prozentual die Anteile am elektrischen Energieverbrauch im privaten Bereich.

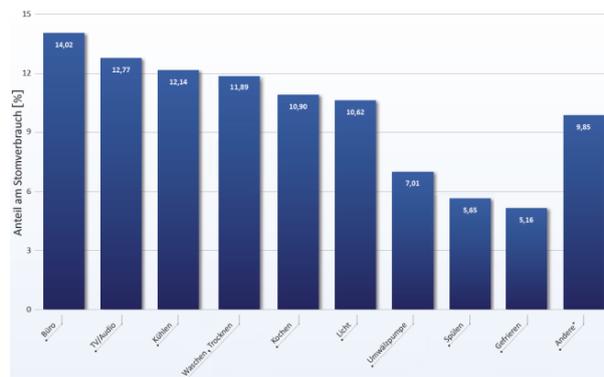


Abbildung 1: „Verbrauchsparade“ Anteile der Verbrauchsbereiche (Haushalte ohne elektrische Warmwasserbereitung 2015) [2]

Moderne Flachbildfernseher oder Computer benötigen ausschließlich Gleichstrom. Auch in der Beleuchtungstechnik gab es in den letzten Jahren einen Wandel. Immer häufiger wird die energiesparemere LED-Technik eingesetzt, welche ebenfalls ausschließlich mit Gleichstrom betrieben wird. Der größte Aspekt jedoch ist die immer stärker zunehmende Energieversorgung von Kraftfahrzeugen.

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, dass bis zum Jahr 2020 eine Millionen Elektrofahrzeuge in Deutschland angemeldet sind [3]. Fahrzeuge, in denen ausschließlich Gleichstrom gespeichert wird. All die genannten mit Gleichstrom betriebenen Elektrogeräte werden aktuell jedoch aus dem 400 V AC-Verteilnetz gespeist. Dadurch muss zum Betrieb der Geräte ein Netzteil vorgeschaltet werden.

Durch regenerative Energietechnik, wie zum Beispiel Photovoltaikanlagen, wird Gleichstrom erzeugt. In Windkraftanlagen (WKA) befindet sich ein Gleichstromzwischenkreis. Der Gleichstrom wird

verlustbehaftet über Wechselrichter in Drehstrom umgewandelt. Dieser Schritt entfällt, wenn die Anlagen direkt in ein Gleichstromnetz einspeisen. Weiterhin ist ein Gleichstromnetz verlustärmer als ein gleichwertiges AC-Netz, da Skin-Effekte und die Bereitstellung von Blindleistung entfällt [4]. Dieser Aspekt wird heute bereits in der High Voltage Direct Current (HVDC) Übertragung, etwa bei der Anbindung von Offshore-Windparks, ausgenutzt. Die stetig sinkenden Preise für Halbleiter und damit einhergehend die sinkenden Preise für Leistungselektronik führen zu der Überlegung, in Bereichen, in denen hauptsächlich Gleichstrom verbraucht wird, sogenannte Microgrids auf DC-Basis zu implementieren. Dies kann zu einer besseren Wirtschaftlichkeit und einem geringeren Energieverbrauch beitragen.

Im Folgenden sollen unterschiedliche DC-Netzaufbauten und die Implementierung von Verbrauchern analysiert und bewertet werden.

3 Elektrische Energienetzformen im Vergleich

Das U.S. Department of Energy definiert Microgrids als eine Gruppe von verbundenen Lasten und verteilten Energieressourcen innerhalb klar definierter Grenzen. Das Microgrid kann als Inselnetz betrieben werden oder zu dem übergeordneten Netz (Macrogrid) hinzugeschaltet werden. [5]

Microgrids sind interessant für die elektrische Energieversorgung, da sie maßgeblich das übergeordnete Netz entlasten oder sogar stützen können.

AC-Microgrids sind bereits weit verbreitet. Das Stromnetz Berlin betreibt als bundesweiter Marktführer bereits über 120 Anlagen [6]. Dem entgegengesetzt befinden sich in der Hierarchie die Macrogrids eine Ebene über den Microgrids und stellen z.B. das Verteilnetz dar. Nanogrids befinden sich eine Stufe unter Microgrids und können z.B. einzelne Häuser mit einer PV-Anlage und einem Energiespeicher darstellen. Eine klare Abgrenzung, ob es sich dabei nur um ein, zwei oder mehr Häuser oder Haushalten handeln darf ist nicht vorhanden.

4 Gleichstromnetze

Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Gleichstromnetzes im Inselbetrieb. Über einen zusätzlichen Wechselrichter kann das DC-Netz mit einem AC-Netz verbunden werden.

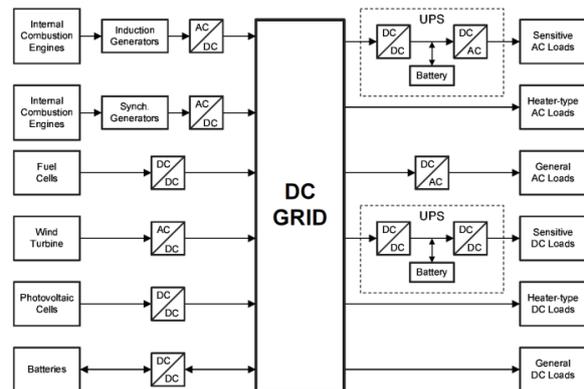


Abbildung 2: DC Netz mit verschiedenen Erzeugern, Verbrauchern und Speichern, die über Gleichspannungswandler und Wechselrichter am DC Netz angeschlossen sind [4]

4.1 Vorteile

Die weit weniger verbreiteten DC-Netze sind ein aktuelles Forschungsthema und polarisieren hinsichtlich ihrer Eigenschaften. Durch den um $\sqrt{2}$ besseren Ausnutzungsgrad der Kabel überzeugen sie vor allem in Bereichen, in denen sehr viel Energie benötigt wird. DC-Netze sind besonders effektiv, wenn größtenteils DC-Lasten betrieben werden sollen, da eine Umwandlung von AC zu DC entfällt. DC-Netze können auch auf der Verteilnetzebene generell als Maschennetz ausgeführt werden, was bei AC-Netzen aufgrund des unterschiedlichen Phasenwinkels oft nicht oder nur mit erheblich technischem Mehraufwand möglich ist [7]. Mit einem Maschennetz kann eine wesentlich bessere Ausfallsicherheit und Effizienz erzielt werden.

4.2 Herausforderungen

Die standardisierte Energieversorgung mit Dreiphasenwechselstrom erschwert es, ein DC-Netz zu integrieren. Geräte die mit Gleichstrom versorgt werden, sind auf dem Markt deutlich weniger verbreitet als AC-Geräte. Ein weiterer Nachteil ist, dass Gleichstromnetze wesentlich anfälliger gegenüber transienter Überspannungen sind, was einen zusätzlichen Aufwand darstellt [8].

Nicht zuletzt sind die teils hohen Gleichströme im Fehlerfall schwieriger auszuschalten als in einem Wechselspannungsnetz. Der fehlende Nulldurchgang führt bei einer Gleichstromschalthandlung zu länger anhaltenden Lichtbögen, die das Kontaktmaterial deutlich stärker verschleifen als es bei Wechselstrom der Fall ist. Die Netzbetreiber können auf eine über einhundertjährige Betriebserfahrung mit Wechselstrom zurückgreifen, sodass hohe Kurzschlussströme in allen Netzebenen sicher beherrscht werden. Für sicheres Schalten von Gleichstrom besteht hingegen noch Forschungsbedarf. [9] Durch zumeist fehlende rotierende Massen, wie sie bei einem AC-Netz vorhanden sind, ist ein DC-Netz nicht spannungssteif [10]. Das bedeutet, dass zugeschaltete Lasten, welche im Einschaltmoment ein vielfaches ihrer Nennleistung verbrauchen (z.B.: unregelmotoren), zu einem unzulässigen Spannungseinbruch führen können.

Die Umrüstung auf DC ist zudem immer mit hohen Kosten verbunden, sodass die Wirtschaftlichkeit einer Umrüstung im Einzelfall betrachtet werden muss.

4.3 Anwendungsbereiche

Die potentiellen Anwendungsgebiete von DC-Netzen sind weit verteilt. Vom Nanogrid in privaten Haushalten, die den externen Energiebezug senken, über Microgrids im kommerziellen Sektor bis hin zu Offshore HVDC-Übertragungsstrecken im GVA-Bereich. Aber auch in Bordnetzen, im Auto bis hin zum Flugzeug oder Schiff, sind DC-Netze zu finden. In Entwicklungsländern ist häufig ein Großteil der Haushalte nicht mit Elektrizität versorgt. Durch regenerative Energietechnik (hauptsächlich PV oder Wind) und Batteriespeicher können auch einzelne weit abgelegene Gebiete elektrifiziert werden [11]. Hier bietet es sich an, Gleichstrom zu verwenden, um die Effizienz zu steigern, da die Netze oft neu aufgebaut werden und somit Umrüstkosten entfallen. Die Netze in Entwicklungsländern werden oft als Inselnetz betrieben und sind dadurch nicht mit einem übergeordneten Netz verbunden, was eine Gleichstromnetzinstallation vereinfacht. Auch in westlichen Ländern kann eine Gleichstromenergieversorgung wirtschaftlicher sein als die Versorgung mit Wechselstrom (siehe Kapitel 5.1) [12]. Rechenzentren benötigen in der Regel sehr viel elektrische Energie. Mithilfe von Gleichstromnetzen können die Verluste gesenkt und somit die Effizienz gesteigert werden (siehe Kapitel 5.2).

5 Gleichstromnetze in der Praxis

Weltweit sind bereits DC-Netze realisiert. Es gibt Firmen, die sich ausschließlich mit der Konzeption und Installation von DC-Netzen beschäftigen [13].

5.1 DC Niederspannungsverteilstrecke

In Finnland wird bereits ein DC-Niederspannungsverteilstrecke als Feldversuch erfolgreich betrieben [12]. Ziel ist es, drei exponiert liegende Verbraucher in 1,7 km Entfernung mit elektrischer Energie zu versorgen. Abbildung 3 zeigt die geografischen Gegebenheiten.

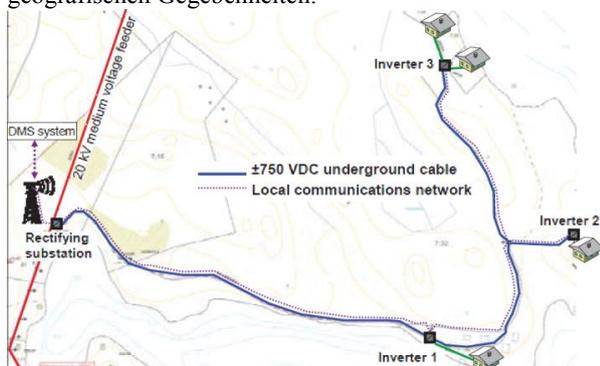


Abbildung 3: Geografische Übersicht der elektrischen Energieversorgungsstrecke [12]

Die Energie wird aus einem 20 kV AC-Verteilnetz entnommen und über Transformatoren wird zunächst die Spannung heruntertransformiert. Hinter den Transformatoren befinden sich die Leistungsschalter, die im Fehlerfall das Netz trennen. Der bipolare 12 puls Thyristorgleichrichter liefert eine Gleichspannung von ± 750 V. Die maximale Kurzschlussleistung des Gleichrichters beträgt 100 kVA. Die drei selbstgeführten IGBT B6 Brücken-Wechselrichter liefern jeweils eine Scheinleistung von 16 kVA. Die Topologie des Stromrichters ist im **Anhang 1** zu sehen. Laut Angaben des Betreibers rentiert sich ein LVDC-Netz dieser Art ab einer Leitungslänge von 1 km. Ausschlaggebend für die Rentabilität sind ebenfalls die angeschlossenen Lasten sowie der Blindleistungsbezug der Verbraucher.

5.2 Rechenzentrum mit Gleichstromnetz

Das Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in Kalifornien forscht seit 2004 an der Effizienz von Rechenzentren [14]. Um die Effizienz im Rechenzentrum zu erhöhen, wurde ein Gleichstrom-Versorgungsnetz aufgebaut. Abbildung 4 zeigt im Vergleich den Aufbau eines herkömmlichen Rechenzentrums mit AC-Stromversorgung mit einem Rechenzentrum mit DC-Stromversorgung. Der Leistungsfaktorkorrekturfilter (PFC), der Zwischenkreistransformator (PDU), der Gleichrichter sowie der zusätzliche Wechselrichter in der unterbrechungsfreien Stromversorgung entfallen bei der DC-Ausführung. Durch die geringere Anzahl an Stromwandlern und der weiteren entfallenden Elemente in der DC-Variante ist diese verlustärmer.

Der Energieverbrauch des LBNL ist durch das ± 190 V Gleichstromnetz 28 % geringer verglichen mit einer 208 V AC-Versorgung und 7 % geringer verglichen mit einer 415 V AC-Versorgung. Die Investitionskosten sind um 15 % geringer, der Platzbedarf sinkt um 33 % und die Ausfallsicherheit wird um 100 % gesteigert. [7]

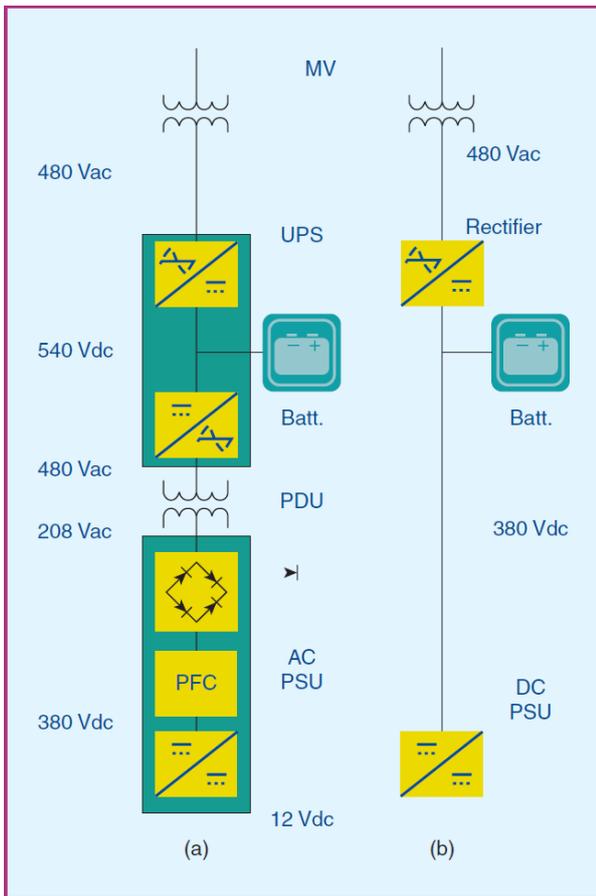


Abbildung 4: Topologievergleich zwischen einem herkömmlichen AC-Rechenzentrum (links) und einem DC-Rechenzentrum (rechts) [14]

5.3 Hochspannungs-Gleichstrom Übertragung (HGÜ)

Die HGÜ-Übertragung ist bereits heute in vielen Ländern der Welt ein elementarer Baustein der Energieversorgung. Einsatz findet die HGÜ-Technik hauptsächlich zur Energieübertragung über weite Distanzen, wo die AC-Übertragung aufgrund der Blindleistungsverluste an ihre wirtschaftlichen Grenzen stößt. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Kopplung von AC-Netzen mit unterschiedlicher Frequenz oder Phase.

In der Nordsee sind zahlreiche Offshore-WKAs installiert. Um die Energie möglichst effizient in das Stromnetz einzuspeisen, wird der von den WKAs erzeugte Wechselstrom zu einer Konverterplattform geleitet, wo er dann mithilfe von Leistungselektronik zu Gleichstrom umgewandelt wird. DolWin ist ein gemeinsames Projekt von den Firmen ABB und TenneT und zählt deutschlandweit zu den größten HGÜ-Projekten. DolWin1 ist die Übertragungsstrecke zwischen der Offshore-Konverterplattform DolWin Alpha und der 380 kV Umspannstation in Dörpen (Niedersachsen). An die Konverterplattform sind über einen 155 kV AC-Anschluss die 3 Windparks Trianel, Riffgrund und Merkur angeschlossen. Abbildung 5 zeigt die Anschluss-topologie der drei Windparks an die Konverterstation. [15]

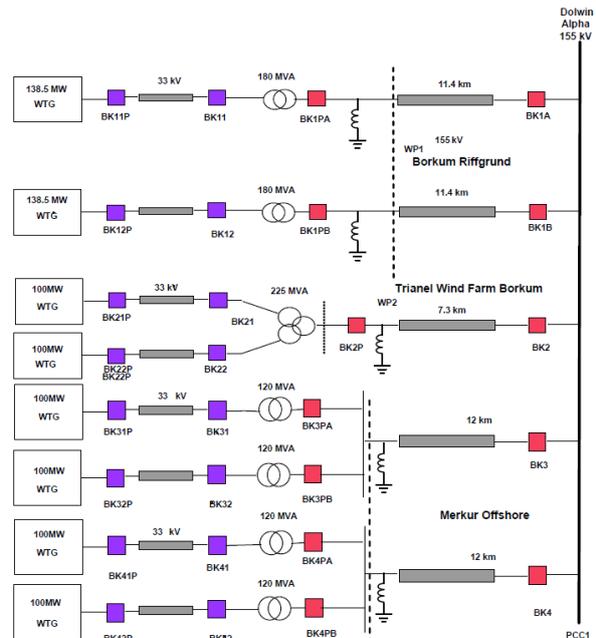


Abbildung 5: Anbindung der Windparks Merkur, Trianel und Riffgrund an die Konverterplattform DolwinAlpha [15]

Auf der Konverterstation wird die Spannung auf ± 320 kV Gleichspannung gerichtet. Die Umwandlungsverluste betragen etwa 1 %. Die Gesamtlänge der Gleichstromverbindung beträgt 165 km. In Dörpen wird die Gleichspannung umgewandelt und in das 380 kV Übertragungsnetz von TenneT eingespeist. Es können maximal 800 MW in das Stromnetz eingespeist werden. [15]

Durch die Gleichstromverbindung entfallen die Blindleistungsverluste und die Energie kann so effizienter übertragen werden.

6 Fazit

Die Integration von DC-Netzen in das bestehende AC-Netz stellt die Netzbetreiber und die Gerätehersteller vor neue Herausforderungen. Gleichstromnetze sind in vielen Fällen effizienter als AC-Netze, wodurch Energie eingespart werden kann. Systeme auf Gleichstrom umzurüsten ist in vielen Fällen jedoch sehr kostspielig und technisch anspruchsvoll. Somit ist immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig, um zu beurteilen ob eine Umrüstung wirtschaftlich ist. Einzelne realisierte Projekte auf der Niederspannungsebene haben jedoch gezeigt, dass die Einbindung von Gleichstromnetzen in das Energieversorgungsnetz technisch und wirtschaftlich möglich ist. Die realisierten Offshore-Projekte zeigen, dass Gleichstrom schon heute nicht mehr aus der Energieversorgung wegzudenken ist.

7 Literatur

- [1] J. Schmiesing, Vorlesungsskriptum Technologien der Verteilungsnetze, TU-Braunschweig, Braunschweig: 2016
- [2] Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“, EnergieAgentur.NRW 2015
- [3] https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/_node.html
- [4] DC Power Systems: Challenges and Opportunities, M. Saedifard et al. IEEE Paper 2010
- [5] <http://energy.gov/sites/prod/files/Microgrid%20Workshop%20Report%20August%202011.pdf>
- [6] <https://www.stromnetz.berlin/de/micro-grids.htm>
- [7] From DC Nano- and Microgrids Towards the Universal DC Distribution System – A Plea to Think Further Into the Future, Laurens Mackay et al. IEEE Paper 2015
- [8] Voltage Transient Propagation in AC and DC Datacenter Distribution Architectures, Emmanuel Taylor, Gregory Reed IEEE Paper 2012
- [9] DEUTSCHE NORMUNGS-ROADMAP Gleichstrom im Niederspannungsbereich Version 1, VDE 2016
- [10] From Voltage Stiff to Voltage Weak DC Distribution Grid: Opportunities and Challenges, Tsegay Hailu et al. IEEE Paper 2016
- [11] Optimization of DC Microgrid for Rural Applications in India, C. Phurailatpam, L. Wang IEEE Paper 2016
- [12] FIELD TEST ENVIRONMENT FOR LVDC DISTRIBUTION – IMPLEMENTATION EXPERIENCES, Tero KAIPAA et al. CIRED Workshop Lissabon 2012
- [13] <http://www.emergealliance.org>
- [14] Artikel „Edison Redux“, Guy Al Lee, William Tschudi, IEEE power & energy magazine, 2012
- [15] DoWin1 – Challenges of Connecting Offshore Wind Farms, Adil Abdalrahman, Emir Isabegovic, IEEE Paper 2016

Anhang 1

Aufbau der Umrichterstation 20 kV AC auf ± 750 V DC

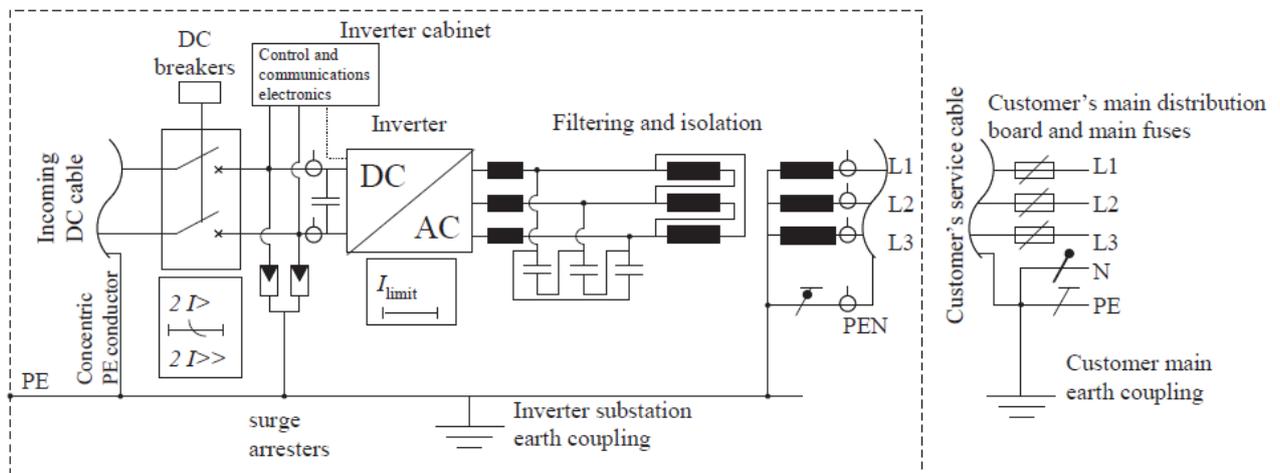
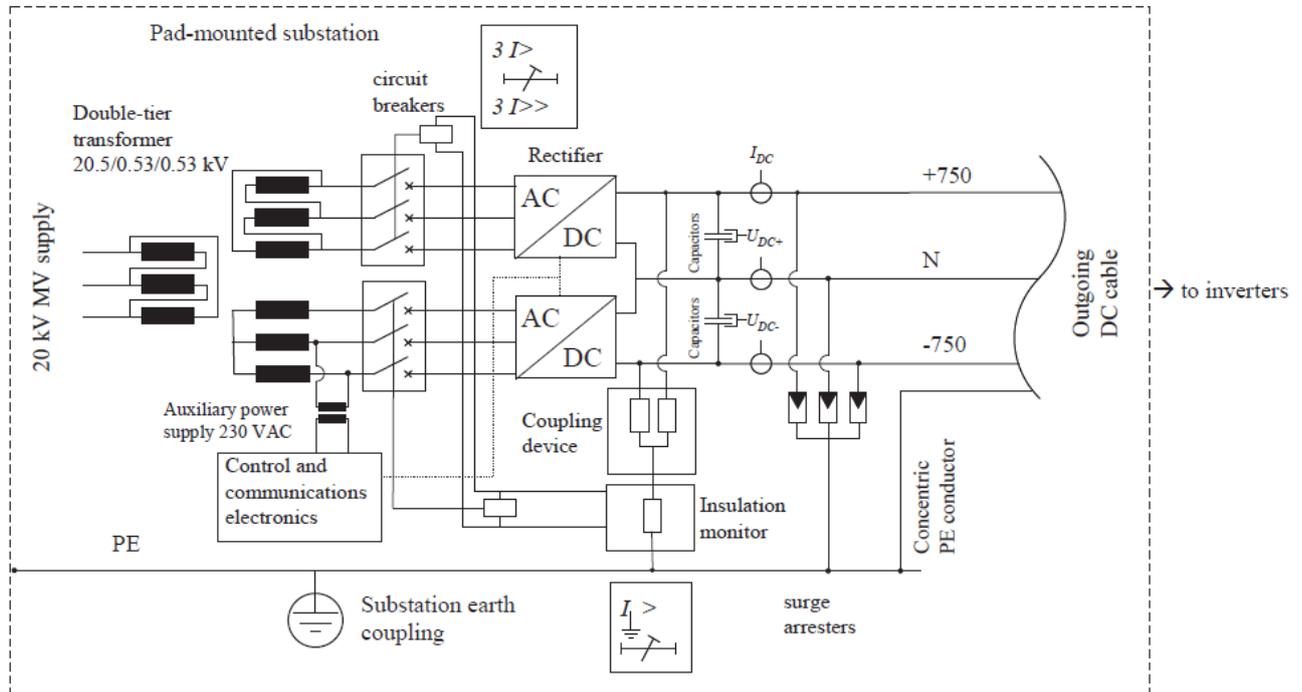




Abb.[1]

Potentiale von Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen

Christoph Steinmann, 05.07.2017

Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Motivation



Abb.[3]

Wandel, Erzeugung und Verbrauch

- Anteil der reinen DC-Geräte hat zugenommen
 - Betrieb der DC-Geräte größtenteils aus dem AC-Netz
 - Umwandlungsverluste
 - Höhere Kosten
- Anteil der DC-Erzeuger hat zugenommen
 - Einspeisung i.d.R. in das AC-Netz
 - Umwandlungsverluste
 - Höhere Kosten

Motivation

Geographischer Wandel

- Große Energiemengen kommen in Zukunft aus der Nordsee
 - Der Energiebedarf steigt vermehrt im Süden und im Ruhrgebiet
 - Nord-Süd Verbindung notwendig
- Wandel von zentraler zu dezentraler Energieversorgung aufgrund von Erneuerbaren Energien
 - Netze müssen in Zukunft vermaschter aufgebaut werden
 - Regenerative Energien müssen bestmöglich eingebunden werden

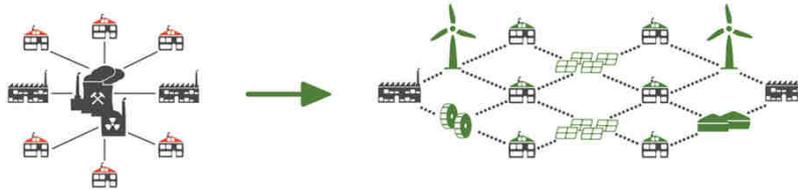


Abb.[4]

Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich

	Gleichstrom	Wechselstrom
Ausnutzungsgrad der Kabel	Bestmöglich	$\sqrt{2}$ schlechter als DC
Umwandlungsverluste Verbraucher	Geringer	Höher, da vermehrt DC-Geräte
Vermaschbarkeit	Unbegrenzt möglich	Eingeschränkt möglich (Phasenwinkel)
Blindleistungsverluste	Keine	Abhängig von Leitungslänge
Kompatibilität der Geräte	Weniger	Geräte i.d.R. für AC konzipiert
Schalthandlungen	Hoch	Geringer (Nulldurchgang)
Netzintegration	Aufwändiger	Einfach, da bestehendes AC Netz bereits vorhanden

Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze

Kopplung von 2 Netzen – Realisierung in Japan, Higashi-Shimizu Frequency Converter

- Netze mit verschiedenen Frequenzen können gekoppelt werden

Energietransport über weite Strecken – realisiert durch ABB/ Tennet

- Keine Blindleistungsverluste auf der Übertragungsstrecke

Gleichstromnetze im gewerblichen/ privaten Bereich

- Effizientere Nutzung der regenerativen Energien
- Umwandlung DC-DC einfacher als DC-AC
 - Weniger Umwandlungen notwendig
 - Umwandlung DC-DC günstiger als DC-AC
- Direktversorgung von DC-Geräten mit Gleichstrom
- Einfachere Einbindung von elektrischen Speichern

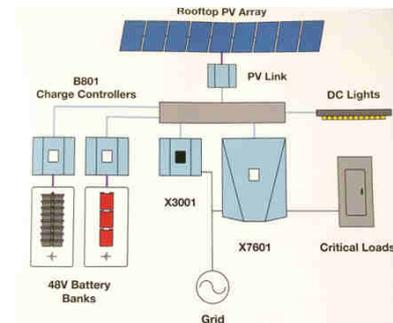


Abb.[7]

Integration eines DC-Microgrids in einem Verteilnetz – Forschung

- Gleiche Vorteile wie zuvor
 - Gasturbinen und Dieselmotoren können mit variabler Frequenz gefahren werden
 - Vermaschung der Netze einfacher (Phasenwinkel)

Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze

Verteilnetz eines Windparks – Forschung

- Das Verteilnetz der Windkraftanlagen wird als DC-Netz statt als AC-Netz ausgeführt
- Die Umwandlungsschritte DC-AC und AC-DC zwischen Onshore-Konverterstation und Windkraftanlagen entfallen
 - Weniger Konvertierungsverluste
 - Offshore-Konverterstation entfällt



Abb.[8]

Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze

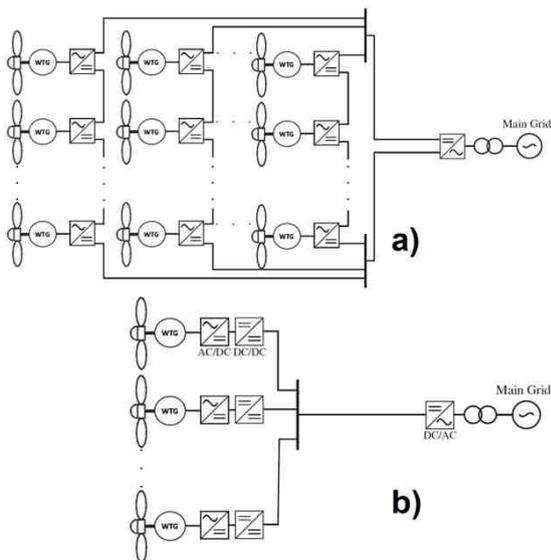


Abb.[9]

a) Serienschaltung der WKAs

- Kein zusätzliches Hochsetzen der Spannung erforderlich
- Weniger Leitungsverluste
- Erhöhte Isolationsanforderung an WKAs
- Stringausfall bei Ausfall einer WKA

b) Parallelschaltung der WKAs

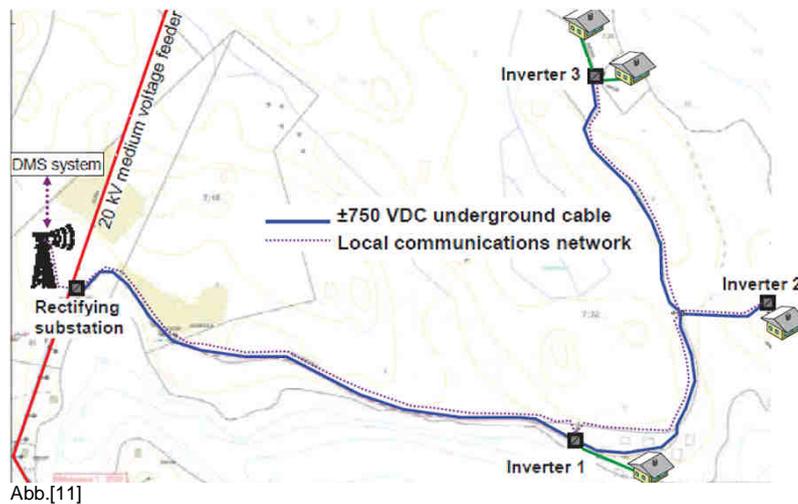
- Isolationskoordination und Ausfallsicherheit unverändert zu AC-Betrieb
- Weniger Leitungsverluste
- Zusätzliches Hochsetzen der Spannung erforderlich

Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Gleichstromnetze in der Praxis

Niederspannungsgleichstromverteilstromnetz in Suomenniemi, Finnland
Lappeenranta University of Technology
Suur-Savon Sähkö



Gleichstromnetze in der Praxis

Niederspannungsgleichstromverteilstromnetz

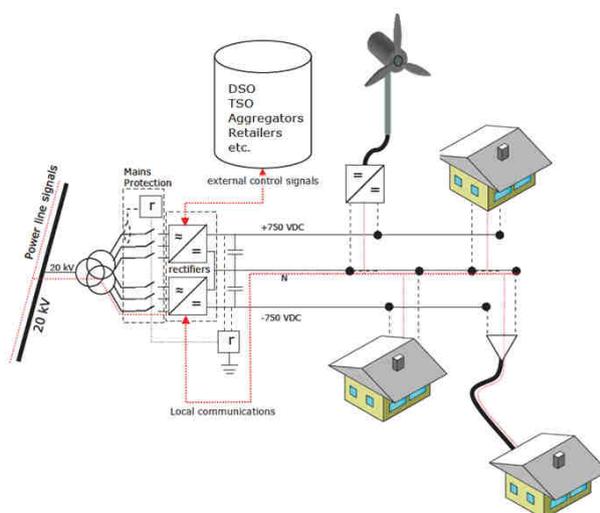


Abb.[12]

Herausforderungen

- Exponierte Lage (1,7 km)

Ziele

- Reduzierung Blindleistungsverluste

Vorgehensweise

- ± 750 V DC ersetzt AC Niederspannung
- Umwandlung aus dem 20 kV AC Verteilnetz

Ergebnisse

- Laut Hersteller rentabel ab einer Leitungslänge von > 1 km
- Blindleistungsverluste entfallen auf der Übertragungsstrecke

Gleichstromnetze in der Praxis

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Kalifornien
United States Department of Energy
University of California Berkeley

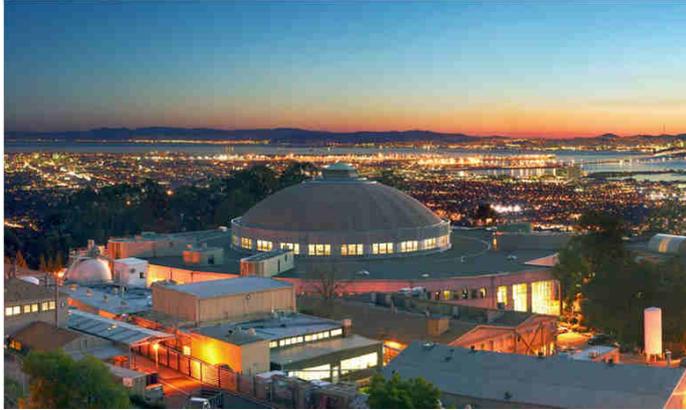


Abb.[13]

Gleichstromnetz in einem Rechenzentrum



05.07.2017 | Christoph Steinmann | Potentiale von DC Energieversorgungsnetzen | Seite 15



Gleichstromnetze in der Praxis

Lawrence Berkeley National Laboratory

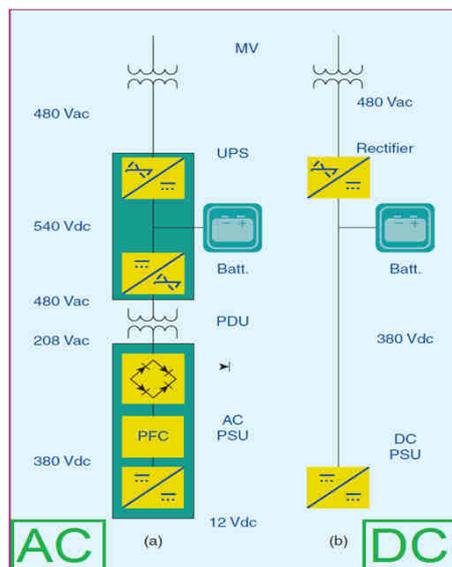


Abb.[14]

Herausforderungen

- Hoher Energieverbrauch
- Hoher Platzbedarf durch Transformatoren

Ziele

- Weniger Umwandlungsschritte durch DC
 - Geringere Kosten
 - Geringerer Platzbedarf
 - Geringerer Energieverbrauch
 - Höhere Ausfallsicherheit

Ergebnisse

- Energieverbrauch 7% geringer (415 V AC)
- Investitionskosten um 15% geringer
- Platzbedarf um 33% geringer
- Ausfallsicherheit um 100% gesteigert



05.07.2017 | Christoph Steinmann | Potentiale von DC Energieversorgungsnetzen | Seite 16



Gleichstromnetze in der Praxis

Dolwin in der Nordsee (Deutschland)

ABB/ Tennet



Abb.[15]

AC-DC / DC-AC Wandlung und Hochspannungsgleichstromübertragungsstrecke



05.07.2017 | Christoph Steinmann | Potentiale von DC Energieversorgungsnetzen | Seite 17



Gleichstromnetze in der Praxis

Dolwin

Effiziente Integration von Offshore-Windenergie mit HVDC Light®

Die Netzanbindung DolWin1 bindet Offshore-Windparks in der Nordsee an das deutsche Stromnetz an

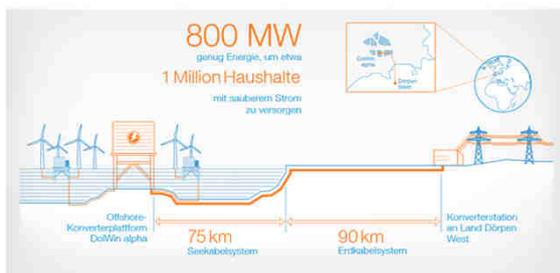


Abb.[16]

Herausforderung

- Energieübertragung aus Windkraftanlagen
- Sehr weite Übertragungsstrecke (165 km)

Ziele

- Reduzierung der Blindleistungsverluste

Ergebnisse:

- Einspeiseleistung Festland: 800 MW
- Umwandlungsverluste Konverter: 1%
- Blindleistungsverluste entfallen auf der Übertragungsstrecke



05.07.2017 | Christoph Steinmann | Potentiale von DC Energieversorgungsnetzen | Seite 18

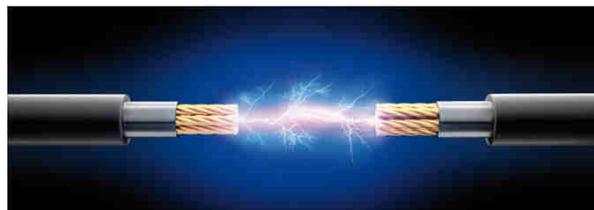


Agenda

- Motivation
- Gleichstrom und Wechselstrom im Vergleich
- Anwendungsgebiete für Gleichstromnetze
- Gleichstromnetze in der Praxis
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Integration von DC-Netzen stellt Netzbetreiber und Gerätehersteller vor eine Herausforderung
- Umrüstung auf DC oft teuer und technisch anspruchsvoll
- Forschungsbedarf in allen Netzebenen
- DC-Netze sind in vielen Bereichen effizienter als AC-Netze
- Laufende Projekte zeigen, dass ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Haben Sie noch Fragen?

Literatur

- [1] J. Schmiesing, Vorlesungsskriptum Technologien der Verteilungsnetze, TU-Braunschweig, Braunschweig: 2016
- [2] Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“, EnergieAgentur.NRW 2015
- [3] https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/_node.html
- [4] DC Power Systems: Challenges and Opportunities, M. Saeedifard et al. IEEE Paper 2010
- [5] <http://energy.gov/sites/prod/files/Microgrid%20Workshop%20Report%20August%202011.pdf>
- [6] <https://www.stromnetz.berlin/de/micro-grids.htm>
- [7] From DC Nano- and Microgrids Towards the Universal DC Distribution System – A Plea to Think Further Into the Future, Laurens Mackay et al. IEEE Paper 2015
- [8] Voltage Transient Propagation in AC and DC Datacenter Distribution Architectures, Emmanuel Taylor, Gregory Reed IEEE Paper 2012
- [9] DEUTSCHE NORMUNGS-ROADMAP Gleichstrom im Niederspannungsbereich Version 1, VDE 2016
- [10] From Voltage Stiff to Voltage Weak DC Distribution Grid: Opportunities and Challenges, Tsegay Hailu et al. IEEE Paper 2016
- [11] Optimization of DC Microgrid for Rural Applications in India, C. Phurailatpam, L. Wang IEEE Paper 2016
- [12] FIELD TEST ENVIRONMENT FOR LVDC DISTRIBUTION – IMPLEMENTATION EXPERIENCES, Tero KAIPIA et al. CIREN Workshop Lissabon 2012
- [13] <http://www.emergealliance.org>
- [14] Artikel „Edison Redux“, Guy Al Lee, William Tschudi, IEEE power & energy magazine, 2012
- [15] DoWin1 – Challenges of Connecting Offshore Wind Farms, Adil Abdalrahman, Emir Isabegovic, IEEE Paper 2016
- [16] <https://www.ke-next.de/startseite-industrie/branchen/neuentwicklungen-fuer-effizientere-schiffsantriebe-azipod-und-gleichstromnetze-130.html>
- [17] High Voltage Current Transmission J. Arrillaga, The Institution of Electrical Engineers, London, 1998

Abbildungen

Abbildung [1]	http://www.smarterworld.de/smart-energy/smart-grid/artikel/119020/
Abbildung [2]	Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“, EnergieAgentur.NRW 2015
Abbildung [3]	http://www.bittner-group.de/kompetenzen/erneuerbare-energien/
Abbildung [4]	https://www.naturstrom.de/ueber-uns/die-naturstrom-ag/vision/
Abbildung [5]	http://forschung-stromnetze.info/projekte/eine-zuverlaessige-stromversorgung-der-zukunft/
Abbildung [6]	http://ccc.inaoep.mx/~jemc/blog/wp-content/uploads/2016/01/microGrid.png
Abbildung [7]	http://energy.gov/sites/prod/files/Microgrid%20Workshop%20Report%20August%202011.pdf
Abbildung [8]	http://cdn4.spiegel.de/images/image-209317-860_panofree-zbcf-209317.jpg
Abbildung [9]	From Voltage Stiff to Voltage Weak DC Distribution Grid: Opportunities and Challenges, Tsegay Hailu et al. IEEE Paper 2016
Abbildung [10]	From Voltage Stiff to Voltage Weak DC Distribution Grid: Opportunities and Challenges, Tsegay Hailu et al. IEEE Paper 2016
Abbildung [11]	Field Test Environment for LVDC Distribution – Implementation Experiences, Tero KAIPIA et al.
Abbildung [12]	Field Test Environment for LVDC Distribution – Implementation Experiences, Tero KAIPIA et al.
Abbildung [13]	https://science.energy.gov/laboratories/lawrence-berkeley-national-laboratory/
Abbildung [14]	Artikel „Edison Redux“, Guy Al Lee, William Tschudi, IEEE power & energy magazine, 2012
Abbildung [15]	http://www.maritimejournal.com/__data/assets/image/0033/527658/Platform.jpg
Abbildung [16]	http://www.ee-news.ch/de/article/31643/abb-ubergibt-offshore-netz-anbindung-dolwin1-in-deutschland

Stand der Technik von Mittelspannungs-Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen

State of the Art of MVDC Power Supply Networks

Adrian Berg,
Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, A.Berg@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Dieser Bericht behandelt den Stand der Technik von Mittelspannungs-Gleichstromübertragung (MVDC) in Energieversorgungsnetzen. Mit den Problemen der dezentralen und flexiblen Energieeinspeisung von erneuerbaren Energien ist es wichtig, Alternativen zur Wechselstromübertragung (AC) zu finden. Nach vielen Errungenschaften und Realisierungen in der Hochspannungs-Gleichstromübertragung werden zunehmend Forschungen im Bereich der MVDC-Übertragung veröffentlicht und auf Praxistauglichkeit geprüft. Im Folgenden werden die Übertragungsnetzwerke betrachtet und die verschiedenen Forschungsschwerpunkte beleuchtet. Ein Gebiet für die MVDC-Übertragung sind die Sammelnetze für Stromrichter von Offshore Windparks. Neben bewährten Techniken wie Kabel und Stromrichtern treten allerdings Probleme bei der Verfügbarkeit von Schaltern und Schutzeinrichtungen auf.

Abstract

This report presents a state of the art of medium voltage direct current (MVDC) in power supply networks. With the problems of the flexibility of energy production in times of renewable energy, it is important to find an alternative to alternate current (AC) transmission. After big improvements in the high voltage direct current (DC) transmission there are also many studies in MVDC to prove the technical utilize. This paper highlights the need for these kinds of networks and shows different studies in this field. One of the main areas for MVDC are the collection grids for offshore power plants. Besides technical proved cables and converters one main problem occurs today: the existence of adequate switches and failure systems for DC transmission on the market.

1 Einleitung

Historisch begann die Energieübertragung und Verteilung mit den Erfindungen von Thomas Edison. Er entwickelte die ersten Generatoren, die mithilfe von Dampfkraft Gleichstrom produzierten. Diese Erfindung leitete die elektrische Revolution ein. Infolgedessen wurden die ersten Übertragungsnetze mit Gleichstrom betrieben. Heutzutage besteht das Netz überwiegend aus der Wechselstromübertragung. Dies rührt daher, dass Wechselstrom durch seine physikalische Eigenschaft vergleichsweise einfach auf- und ab transformiert werden kann. Dies führt zu einer geringeren Leistung und damit niedrigen Verlusten [1].

Wechselstrom bringt neben seinen Vorteilen auch Nachteile mit sich. Physikalisch gibt es bei der Wechselstromübertragung bedingte Grenzen. Diese werden erreicht, wenn die Kapazität, die von der Länge maßgeblich beeinflusst wird, zu hoch ist. In dem Fall wird die Leitung geladen und entladen. Durch diese Problematik und die dezentrale Produktion von Energie, ist es notwendig die Gleichstromübertragung weiter zu entwickeln. Ein gutes Beispiel dafür ist die Produktion von Windenergie auf den Meeren. Dort werden hohe Distanzen erreicht, die durch die gängige Technik zu unnötigen Verlusten führen.

Bei der Gleichstromübertragung sind die einschränkenden Faktoren der Leitungswiderstand und die thermische Leitfähigkeit bei der Übertragung. Zu diesen Problemen

kommen noch andere, mit denen sich diverse Ausarbeitungen beschäftigen. Um zu klären, ob diese Technologie heutiger Standards standhält und zudem kosteneffizient ist, wird im Folgenden behandelt.

2 Theoretische Grundlagen

Der Vorteil des Wechselstroms ist das alternierende Feld, welches zu einem magnetischen Wechselfeld führt. Das magnetische Wechselfeld wird wiederum von Transformatoren genutzt, um mithilfe der magnetischen Koppelung eine effizientere Spannungsebene zu erreichen. Das wechselnde Feld führt allerdings in der Übertragung zu Verlusten, da in der Leitung oder in dem Kabel, Leistung bei der Umpolung der Felder umgesetzt wird. Diese Leistung muss bei der Gleichstromübertragung nur einmal erbracht werden [2]. Eine Hauptkomponente der Gleichstromübertragung ist die Stromrichteranlage. Dies ist nötig, da anders als bei Wechselstrom, keine Transformatoren eingesetzt werden können, aufgrund von im Vorfeld genannten stationären Verhaltens [2]. Um den Strom von Gleich- auf Wechselstrom und umgekehrt zu wechseln, werden heutzutage größtenteils zwei Technologien genutzt. Die Thyristor-Basierte CSC-Übertragung oder auch gesteuerte Silizium-Gleichrichter. Diese Technik wird für hohe Leistungen und hohe Distanzen eingesetzt. Es ist eine der kosteneffizientesten Technologien für die Gleichstromübertragung. Neben den ökonomischen

Vorteilen ist diese Technik fähig das Netz in bidirektionalen Wegen mit Wirkleistung zu speisen und zu belasten [3].

Für hohe Flexibilität wird die Voltage Source Converter Übertragung benutzt. Diese basiert auf Bipolar Transistoren mit isolierter Gate-Elektrode (IGBT). Die Technik ist in der Lage das Netz mit Blindleistung zu unterstützen und kann die Wirkleistung in beide Richtungen leiten. Beide Technologien nutzen große Kapazitäten um die Spannung zu glätten [3]. Ein typisches Verteilungsnetz für ein Offshore Windpark besitzt folgende Komponente. Die Turbine produziert Wechselstrom in einem Spannungsbereich, der abhängig von der Windstärke ist. Dieser Strom passiert einen Einphasen Multi-Level-Gleichrichter um diesen in Gleichstrom zu richten. Fortgesetzt wird der Prozess durch einen Zwischenkreis, verbunden mit einem Einphasen-Inverter, der eine Hochfrequenz-Resonanzverbindung speist. Diese hohe Spannung ist notwendig, um den Gleichrichter für die MVDC-Übertragung zu erreichen. Anschließend wird die Spannung durch Kondensatoren geglättet. Die Leitungen werden so beschaltet, dass zwischen beiden die Betriebsspannung anliegt. Dies wird erreicht, wenn man einen positiven und negativen Spannungsbereich wählt. Die für die Übertragung verwendeten Leitungen sind in der Regel einadrige XLPE-Kabel [3]. Diese Beschaltung wird auch bei anderen Gleichstromübertragungen eingesetzt.

3 Stand der Technik

Um einen Überblick über den neuesten Stand der Technik im Bereich der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung zu erhalten, werden noch einmal die Gründe für den Wechsel und seine Vorteile beleuchtet. Es wurde gezeigt, dass Wechselstrom ab einer kritischen Entfernung keine Leistung mehr überträgt. Dies tritt vor allem bei der unterirdischen Kabelverlegung auf, da sich die Kapazität bei der Art erhöht. Dies ist auch bei der Seekabelverlegung zu beachten.

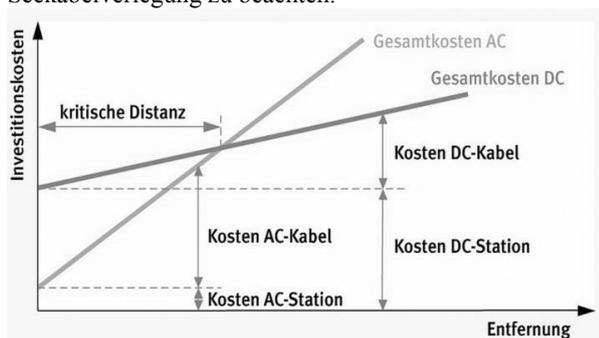


Bild 1: Investitionskosten in Beziehung zur Entfernung [6]

In Bild 1 ist schematisch dargestellt, ab welchem Punkt sich die Verlegung von Gleichstromkabeln rentiert. Der Schnittpunkt bewegt sich immer mehr zugunsten der DC-Technologie. Dies rührt daher, dass durch bessere Fertigung und neue Werkstoffe die Materialien kostengünstiger produziert werden können.

Da die Mittelspannung für große Verbraucher prädestiniert ist und oft in Ballungszentren liegt, wird die Übertragung mit Kabel bevorzugt. Dies könnte man mit der MVDC-Übertragung effizient umsetzen.

Im Jahre 2011 haben F. Mura und Rick. W. De Doncker ein Paper veröffentlicht, das die Machbarkeit eines Labortestfeldes, welches mit MVDC versorgt wird, untersucht. Das Schema dazu wird in Bild 2 gezeigt und wurde mit PSCAD simuliert. Im Rahmen der Studie wurden das Netz auf Startverhalten, magnetische Feldstärke und Fehlverhalten untersucht. Alle Punkte hielten den gängigen Grenzen der VDE stand und bewiesen die Machbarkeit [5].

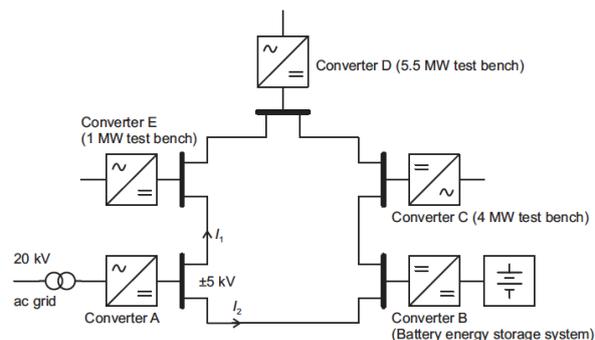


Bild 2 Einadriges Diagramm für die MVDC-Übertragung [5]

Im gezeigten Fall wurde das Master/Slave Kontrollverfahren eingesetzt. Dies sorgt dafür, dass ein Stromrichter der Master ist und die anderen Wechselrichter ihm folgen. Bei kleineren Netzwerken ist das Kontrollverfahren einfach anwendbar, allerdings nicht bei komplexeren wie z. B. bei Stromnetzen mit mehreren Einspeisepunkten.

Beim aktuellen Stand der Technik, sind vermaschte Netze mit der Gleichstromübertragung schwer realisierbar. Technisch ist es möglich, allerdings drückt dieses Problem den Preis für solche Systeme nach oben [6].

In anderen Fällen wie der Energieproduktion ist dieses Problem nicht relevant. Dies wurde gezeigt von C. Zahn u. a. im Jahre 2010. Anhand eines Offshore Windparks wurde ein Vergleich zwischen Wechselstrom- und Gleichstrom-Sammelnetzen getätigt. Seitdem HVDC-Übertragung für solche Anlagen gängige Praxis ist, wäre der nächste logische Schritt die Energie der Turbinen direkt mit MVDC zur Sammelstation zu übertragen. Durch Analyse der technischen Möglichkeiten und unter Aspekten der Kosteneffizienz wurde die AC- und DC-Mittelspannungsübertragung verglichen. Wie in Bild 3 zu sehen ist, wird direkt an der Turbine die gewonnene Energie in Gleichspannung umgewandelt und mit Resonanzkopplung auf Mittelspannung gebracht.

Dieser Aufbau ist vergleichsweise leicht zu regeln, da von den Turbinen keine Frequenz überwacht werden muss.

Außerdem ist das Netzwerk Modular aufgebaut und damit jederzeit erweiterbar durch neue Generatoren. Das führt auch dazu, dass man keine Restriktionen bei der Auswahl der Turbinen Art hat [7].

Durch Wechsel von Wechselstrom- zu Gleichstromgeneratoren würden zudem weitere Vorteile erreicht werden. Es könnten Aspekte wie die

Beeinflussung von Blindleistung eliminiert werden. Dies würde auch dazu führen, dass Turbinengehäuse kleiner dimensioniert werden könnten, da die Netzregelungskomponenten wegfallen [8]. Generell gilt, dass durch die Einsparung von Wechselrichtern bzw. Netzteilen viel Platz und Gewicht eingespart werden kann. Mit Augenmerk auf Spannungsebene und dem benötigten Querschnitt werden zudem Bordnetze für Schiffe oder Flugzeuge entwickelt [1].

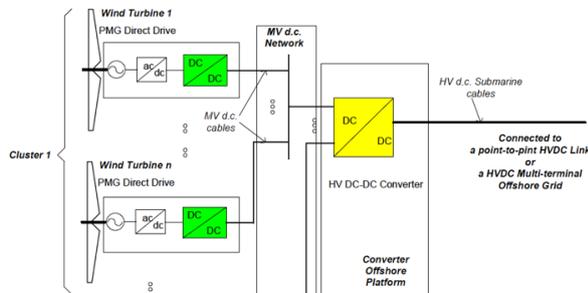


Bild 3: Offshore MVDC Sammelnetz [7]

Durch Erforschung in der Steuerung und Regelung werden auch neue Möglichkeiten zur Realisierung von sogenannten Microgrids erbracht. Anhand der G-VSC Technik die mit „droop control“ regelt, ist es möglich diverse Quellen in einem Netz zu- und wegzuschalten. Diese Regelung funktioniert mit zwei Kaskaden, welche die Wirtschaftlichkeit und Netzstabilität überwachen. Die erste sogenannte Referenzoptimierung hat die Langzeitvorhersage des Netzes als Startwert. Diese „Erfahrungswerte“ hat man von den Kunden, wonach heutzutage auch das Netz gefahren wird. Der zweite Regelkreis orientiert sich an der Kurzzeitvorhersage und bezieht diverse wirtschaftliche Aspekte ein. Die tatsächliche technische Steuerung findet allerdings im „droop control modul“ statt, wie in Bild 4 zu sehen ist [9].

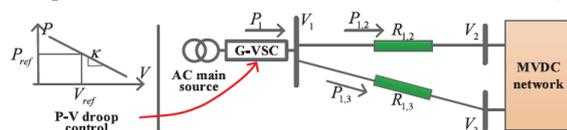


Bild 4: vereinfachte MVDC Schemata einer „droop controlled“ G-VSC Steuerung [9].

Diese Regelung und Steuerung von diversen Quellen ist auch nötig um eine MVDC-Übertragung zu nutzen. Anders als bei der HVDC-Übertragung, die bei mit Kraftwerken verglichen werden kann und definierte Leistung überträgt, sind die Ansprüche an die MVDC-Übertragung andere. Hierbei muss es um die flexible und effiziente Energieübertragung von verschiedenen Quellen und Verbrauchern gehen.

4 Fazit

Bedingt durch historische Ereignisse begann man mit der Gleichstromübertragung und -verteilung. Diese wäre heute in einer Welt, in der es größtenteils Gleichstromverbraucher gibt, die ideale Wahl. Durch

technische Schwierigkeiten bzw. aus ökonomischen Gründen wurde allerdings ein Wechselstrom-Verteilungsnetz aufgebaut, wie es heute größtenteils existiert. Bis zu der Zeit, in der die dezentrale Energieproduktion keine Relevanz hatte, war dieses System auch kein Problem. Allerdings ist man an einem Punkt angekommen, wo es immer mehr dezentrale Gleichstromproduzenten und -verbraucher gibt. Zu den Verbrauchern wird das Elektroauto zählen, das in Zukunft vermutlich nahezu jeder besitzen wird. Diese Bedürfnisse könnte die MVDC-Übertragung bedienen. Flexibel und effizient könnte sie die Technologie der Zukunft sein. Durch Studien wurde bewiesen, dass die elektromagnetische Verträglichkeit gegeben ist und diese den Schutzstandards standhält. Negative Aspekte treten dadurch auf, dass es an fehlenden Schaltern, Schutz- und Regelungstechnik am Markt mangelt. Explizit an der Regelung gibt es aktuell großen Forschungsbedarf. In Bereichen, wo MVDC-Übertragung seine Vorteile ausspielen könnte, müsste man vermaschte und somit schwer regelbare Netze erstellen. Diese Problematik ist allerdings temporär, wie man auch bei der Halbleitertechnik und im Zuge dessen der Stromrichtertechnik gesehen hat, die erst Wechselrichter effizient macht.

5 Literatur

- [1] Dale R. Patrick, Electrical Distribution Systems, Lilburn: The Fairmont Press, 2009.
- [2] H. Heuck, K.-D. Dettmann and D. Schulz, Elektrische Energieversorgung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2009.
- [3] J. Arrillaga, Y.H. Liu and N.R. Watson, Flexible Power Transmission, England: John Wiley & Sons Ltd, 2007
- [4] Dorman Wensky, FIZ Karlsruhe GmbH, LIDAR-den Wind mit Laserstrahlen messen, 06.2017, <http://www.bine.info/>
- [5] F.Mura, Rik. W. De Doncker, Design Aspects of a Medium-Voltage Direct Current Grid for a University Campus, RWTH Aachen University: E.ON ENergy Research Center, 2011.
- [6] Dr. Rüdiger Paschotta, RP Photonics Consulting GmbH, Hochspannungs-Gleichstromübertragung, 06.2017, https://www.energie-lexikon.info/hochspannungs_gleichstromuebertragung.html
- [7] C. Zahn, C. Smith, A. Crane, A. Bullock, D. Grieve, DC Transmission and Distribution System for a Large Offshore Wind Farm, London: IET, 2010.
- [8] M. T. Daniel, H. S. Krishnamoorthy, P. N. Enjeti, A New Wind Turbine Interface to MVDC Grid with High Frequency Isolation and Input Current Shaping, Texas: IEEE, 2014
- [9] J. Ma, G. Geng und Q. Jiang, Two- Time-Scale Coordinated Energy Management for Medium-Voltage DC Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 5, Texas: IEEE, 2016



Stand der Technik von Mittelspannungs-Gleichstrom-Energieversorgungsnetzen

Adrian Berg, 05. Juli 2017

Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstrom-Übertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstrom-Übertragung
- Zusammenfassung



Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstrom-Übertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstrom-Übertragung
- Zusammenfassung

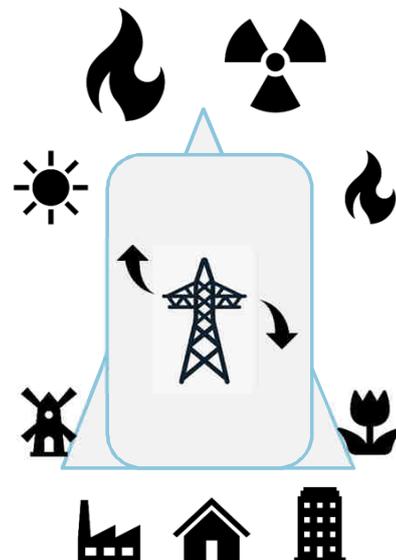
Motivation

Historie

- Verteilungsstruktur: „Top-Down-Prinzip“
- Lokale Produktion und Verbraucher

Energiewende

- Energiewende führt zur dezentralen Energieproduktion
- Nachteile bei der Wechselstromübertragung
- Gleichstromproduzenten und -verbraucher
- Nur unterirdische Leitungsverlegung
- Effiziente Übertragung



Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Zusammenfassung

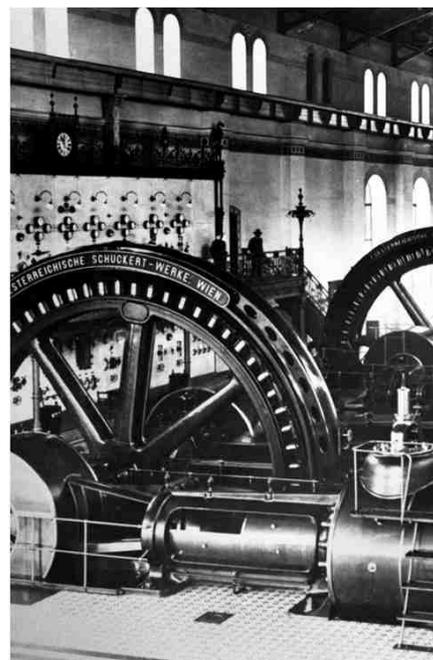
Geschichte der Energienetze

Beginn der Kraftwerkstechnik mit Gleichstrom

- Leuchtmittel
- Straßenbahnen
- Industrie
- Gleichstromnetze
- Batterietechnik

Wechsel zum Drehstrom

- Effiziente Fernübertragung
- Erste Synchrongeneratoren
- Nachteile wurden in Kauf genommen

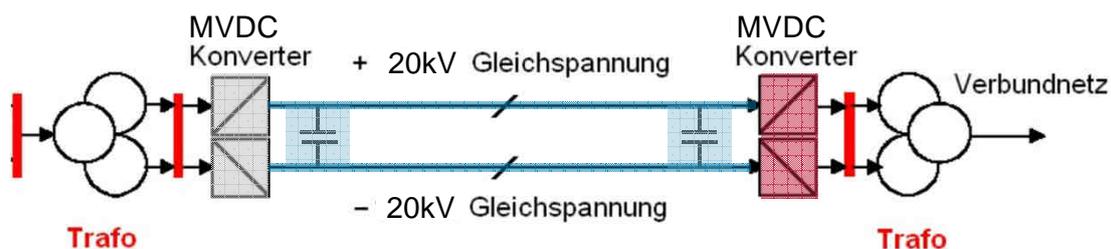


Quelle: www.wikipedia.org

Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Zusammenfassung

Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung



Quelle: www.netzausbau.de

Komponenten einer Gleichstromübertragung

- Konverter: Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln
- Koppelkondensatoren zur Glättung der Spannung
- Leitung/Kabel oft in einzelner Ausführung
- Konverter: Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln

Grundlagen

Thyristor-Based CSC Transmission

- Gesteuerter Siliziumgleichrichter (SCR)
- Hohe Leistungen
- Hohe Distanzen
- Kosteneffizient
- Zwei Wege Übertragung möglich
- Keine Blindleistungsbereitstellung möglich

VSC Transmission Based on IGBT

- Basierend auf bipolar Transistoren mit isolierter Gate-Elektrode
- Zwei Wege Übertragung möglich
- Bereitstellung und Aufnahme von Blindleistung
- Netzstabilisierung
- Übertragungsleistungen von 300MW
- Keine Wechselstromversorgung notwendig

Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Zusammenfassung

Einsatzgebiete



Kollektornetz für Offshore Windenergie



Netzanbindung in der Mittelspannung



Boardnetz für Schiffe



Boardnetz für Flugzeuge



Versorgung für Ladestationen



Versorgung vom Bahnverkehr (Ausblick: Hyperloop)

Kostenvergleich

Einsatzgebiet

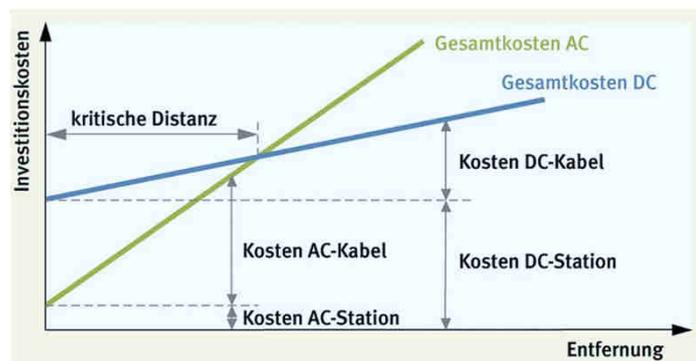
- Punkt zu Punkt Übertragung
- Maschennetz
- Sammelnetz

Verlegeart

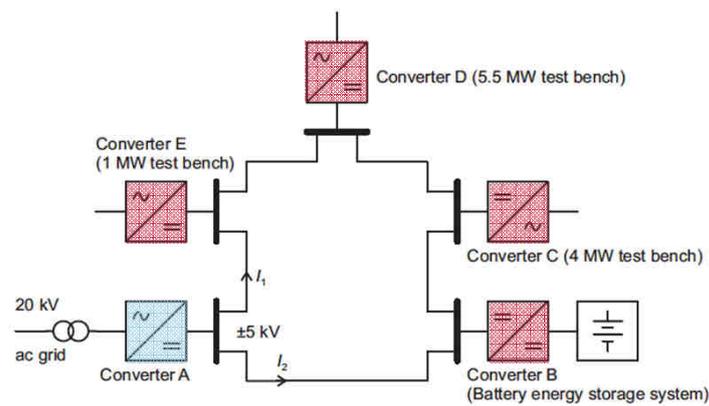
- Kabel
- Freileitung

Kosten

- Welche Entfernung
- Kosten einer DC-Station generell höher als einer AC-Station



Labortestfeld an der RWTH Aachen

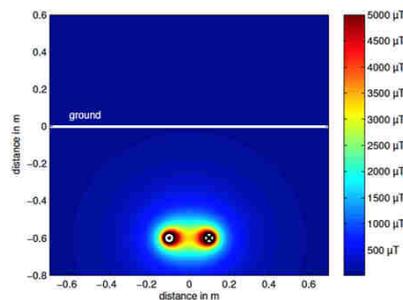


Machbarkeit Studie eines Labortestfeldes

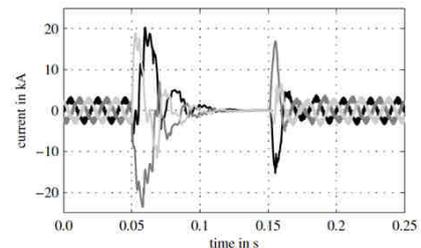
- Master/Slave Kontrollverfahren
- 2 Wege Ringtopologie

Labortestfeld in RWTH Aachen

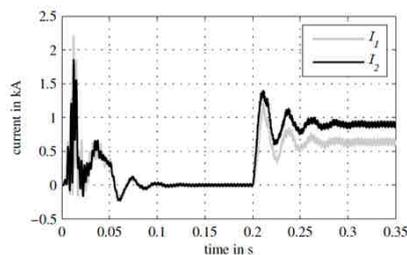
- Analyse auf gängige Normen und Grenzwerte
- Startverhalten im AC- und DC-Netz
- Strom im Fehlerfall



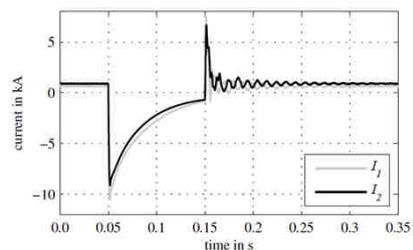
Magnetisches Feld



Fehlerstrom im Drehstromnetz

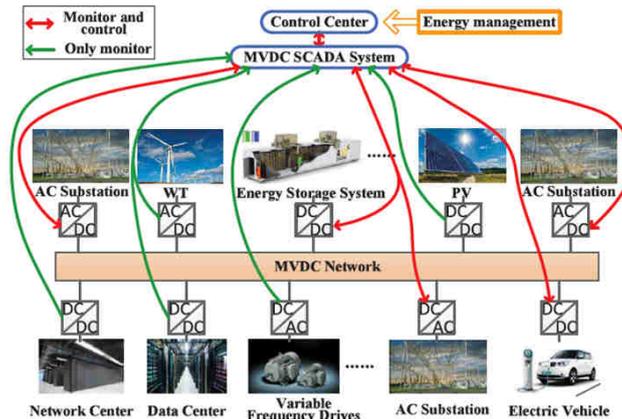


Strom beim Start



Fehlerstrom im DC-Netz

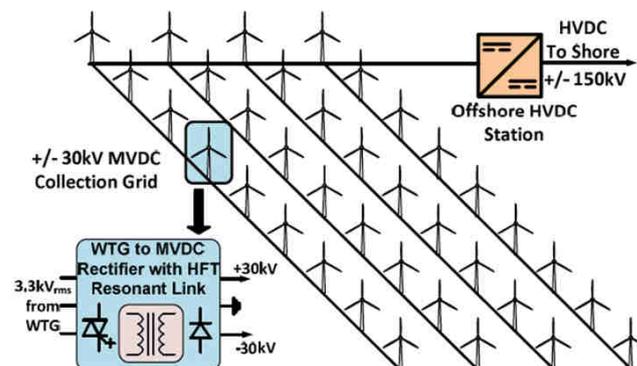
Energieverteilungsnetz



“P-V droop control“ zur Regelung des Netzes

- Auf Basis der G-VSC Einheit
- Führt das Netz anhand von Kurzzeit- und Langzeitvorhersagen.
- Liefert Stabilität bei vielen Quellen

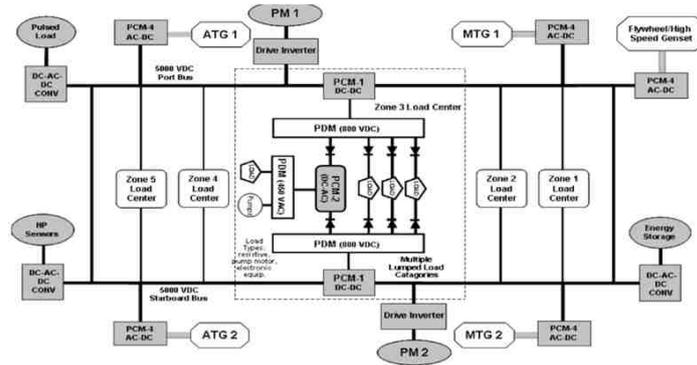
MVDC Sammelnetz



MVDC Sammelnetz für Offshore Windpark

- Einfache Kabelverlegung
- Keine Frequenzanpassung nötig
- Keine Blindleistungsbeeinflussung zwischen den Turbinen
- MVDC/HVDC Verbindung vereinfacht

Boardnetz für Militärschiffe



Boardnetz zur Energieverteilung

- Gewichtseinsparung da höhere Leistung übertragen werden kann
- Geringere Isolation nötig
- Keine Gegenkopplung von Induktionsströmen in Schiffsrumpf
- Gleichstromverbraucher brauchen keine Transformatoren, führt wiederum zur gewichtsreduktion

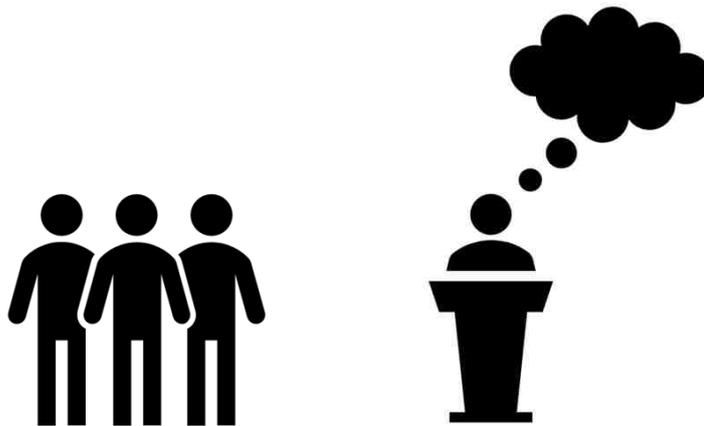
Agenda

- Motivation
- Geschichte der Energienetze
- Grundlagen der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Forschungsgebiete der Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Wandel der Anforderung an Energieproduktion und -verteilung
- Dezentrale Produktion stellt das Energienetz vor neue Probleme
- Neue Technologien und Verfahren senken die Investitionskosten
- Einsatzgebiete insbesondere bei Sammelnetzen für Erneuerbaren Energien
- Einsatzgebiete von Mittelspannungs-Gleichstromübertragung
- Probleme der Gleichstromübertragung

Fragen



Normative Isolierstoffcharakterisierung in der Hochspannungstechnik und im Explosionsschutz

Normative characterization of insulating material in high voltage applications and explosion protection

Niklas Rühmann, Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, n.ruehmann@tu-bs.de

Kurzfassung

Dieser Bericht befasst sich mit der unterschiedlichen Charakterisierung von Isolierstoffen in der Hochspannungstechnik und im Explosionsschutz. Es wird auf die verschiedenen Methoden der Messung des Oberflächenwiderstands und die Bestimmung des spezifischen Oberflächenwiderstands eingegangen. Die Unterschiede bei der Konditionierung, der Elektrodenanordnung und der zu verwendenden Messspannungen werden erläutert. Am Ende werden die Normen aus Explosionsschutz und Hochspannungstechnik gegenübergestellt und ihre prägnanten Vorteile und Nachteile genannt.

Abstract

This report deals with the different characterization of insulating materials in high voltage applications and explosion protection. The different methods of measuring the surface resistivity and calculation of the specific surface resistivity are shown. The differences in conditioning, arrangement of electrodes and voltages to be used while testing are explained. Eventually the norms from explosive protection and high voltage applications are compared and significant advantages and disadvantages are named.

1 Einleitung

Isolierstoffe bilden einen wichtigen Zweig der Hochspannungstechnik, da sie unter anderem die sichere Trennung von Potentialen sicherstellen sollen. Außerdem gibt es je nach Einsatzgebiet gewisse mechanische und chemische Anforderungen an die Isolierstoffe. [1]

Um die Konformität zu diesen Anforderungen sicherzustellen gibt es für die einzelnen Bereiche Werkstoffprüfungen, die der Isolierstoff bestehen muss.

Der Explosionsschutz stellt einige spezielle Anforderungen an verwendete elektrische Anlagen und Isolierstoffe. Für eine Explosion sind drei Komponenten erforderlich: Sauerstoff, Zündquelle und ein fein verteilter brennbarer Stoff. Um eine Explosion zu unterbinden dürfen nicht alle Komponenten gleichzeitig an einem zu schützenden Ort vorhanden sein. [2]

Elektrischer Strom stellt hierbei eine Zündquelle dar, deren wirksam werden unterbunden werden muss. Beispielsweise sind elektrostatische Auf- und Entladung, Potentialunterschiede und Erwärmung durch fließende Ausgleichsströme mögliche Zündquellen. Auf der Oberfläche fließende Ströme sind hierbei besonders kritisch. [3]

Der folgende Bericht befasst sich mit der Charakterisierung von Isolierstoffen nach den Normen IEC 60079-0 und IEC 60079-32-2 aus dem Explosionsschutz und der IEC 60093 aus der Hochspannungstechnik. Es werden auf die dort beschriebenen Methoden der Oberflächenwiderstandsmessung eingegangen und die jeweiligen Besonderheiten hervorgehoben.

2 Theoretische Grundlagen

Die Güte eines Isolierstoffs wird unter anderem durch seinen spezifischen elektrischen Widerstand bestimmt. Hierbei wird zwischen Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand unterschieden.

Der Durchgangswiderstand eines Probekörpers hängt von Temperatur, Feldstärke, Beanspruchungszeit und Feuchtigkeit ab. Der Oberflächenwiderstand weist zusätzlich zu diesen ebenfalls eine große Abhängigkeit von der Beschaffenheit eventuell vorhandener Fremdschichten auf. [4]

Die Prüfnormen schreiben vor, wie Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand experimentell zu ermitteln sind. Auf den Probekörper werden nach Normvorgaben Elektroden aufgebracht. Nun kann der jeweilige Widerstand direkt über ein Messgerät ermittelt werden, oder er kann indirekt über den Abgleich einer Wheatstone-Brücke bestimmt werden. Mit den Formeln (1) für den Durchgangswiderstand und (2) für den Oberflächenwiderstand lassen sich die spezifischen Widerstände aus den Messwerten und Abmessungen von Prüfling und Elektroden berechnen. [5]

$$\rho = R_D \cdot \frac{A}{h} \quad (1)$$

$$\sigma = R_O \cdot \frac{p}{g} \quad (2)$$

mit:

- ρ spezifischer Durchgangswiderstand
- R_D gemessener Durchgangswiderstand
- A Elektrodenfläche auf Probekörper

- h mittlere Dicke des Probekörpers
- σ spezifischer Oberflächenwiderstand
- R_O gemessener Oberflächenwiderstand
- p effektiver Elektrodenumfang
- g Abstand zwischen Elektroden

Mit den berechneten spezifischen Widerständen lassen sich verschiedene Probekörper vergleichen. Somit wird es möglich Rückschlüsse auf die Eignung des Isolierstoffs für den gewünschten Anwendungsbereich zu ziehen.

Der Widerstand von Isolierstoffen lässt sich in drei Klassen einteilen: leitfähig, ableitfähig und isolierend. **Tabelle 1** zeigt diese Einteilung mit den zugehörigen Wertebereichen.

	ρ in Ωm	R_O in Ω
Leitfähig	$\rho < 10^4$	$R_O < 10^4$
Ableitfähig	$10^4 < \rho < 10^9$	$10^4 < R_O < 10^{10}$
Isolierend	$\rho > 10^9$	$R_O > 10^{10}$

Tabelle 1 Klasseneinteilung Widerstände [6]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Dieses Kapitel befasst sich mit den Vorgaben, die die Normen für die Prüfungen vorgeben. Es wird insbesondere auf die Konditionierung des Prüflings, die Elektrodenkonfiguration und die Messung eingegangen.

3.1 Konditionierung

Die Konditionierung beschreibt, wie ein Prüfling auf die Prüfung vorzubereiten ist und wie die Anforderungen an z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit vor und während der Prüfung sind.

IEC 60093 Prüfverfahren Elektroisolerstoffe

Die IEC 60093 „Prüfverfahren für Elektroisolerstoffe“ verweist auf die jeweilige Werkstoffnorm, welche die Prüflingskonditionierung vorgibt. Als Referenz für die empfohlenen Prüfbedingungen wird die IEC 212 „Standard conditions for use prior to and during the testing of solid electrical insulating materials“ und für die relativen Feuchtigkeiten die IEC 260 „Test enclosures of non-injection type for constant relative humidity“ angegeben. Wenn es nicht anders festgelegt wurde, darf der Probekörper nicht gereinigt werden. [5]

IEC 60079-0 Explosionsschutz Allgemein

Die Norm IEC 60079-0 „Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Betriebsmittel – Allgemeine Anforderungen“ beschreibt, wie der Probekörper zur Prüfung von Oberflächenwiderständen bei nichtmetallischen Gehäuseteilen vorbereitet werden soll. Der Prüfling soll zuerst mit destilliertem Wasser, danach mit Isopropylalkohol oder vergleichbaren Flüssigkeiten und daraufhin wieder mit destilliertem Wasser gereinigt werden. Anschließend soll er getrocknet, sowie 24 Stunden bei $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ und $(30\pm 5)\%$ oder $(50\pm 5)\%$ relativer Luftfeuchtigkeit klimatisiert werden. Diese Bedingungen sind auch während der Prüfung einzuhalten. [7]

IEC 60079-32-2 Explosionsschutz Elektrostatik

Nach IEC 60079-32-2 „Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 32-2: Elektrostatische Gefährdungen – Prüfverfahren“ soll der Probekörper 24 Stunden bei $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ und $(25\pm 5)\%$ relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert und geprüft werden. Es wird darauf hingewiesen, dass in Ländern mit abweichendem Klima zusätzlich auch unter lokalen Klimabedingungen geprüft werden sollte. Der Probekörper soll mit einem sauberen Pinsel oder bei stärkeren Verschmutzungen mit Isopropylalkohol oder Vergleichbarem gereinigt werden. Danach soll der Probekörper an der Luft trocknen. [8]

3.2 Elektrodenkonfiguration

Nachdem der Probekörper konditioniert wurde, kann die Messung des Oberflächenwiderstands vorbereitet werden. Hierzu müssen Elektroden auf den Probekörper aufgebracht werden. Die zu verwendende Anordnung und der Werkstoff der Elektroden unterscheiden sich bei den verschiedenen Normen.

IEC 60093 Prüfverfahren Elektroisolerstoffe

Die IEC 60093 schreibt die Verwendung von drei Elektroden vor. Eine mögliche Elektrodenanordnung zeigt **Bild 1**. Diese Anordnung wird auch als Schutzringanordnung bezeichnet. Elektrode 1 ist die geschützte Elektrode, Elektrode 2 ist die ungeschützte Elektrode und Elektrode 3 ist die Schutzelektrode.

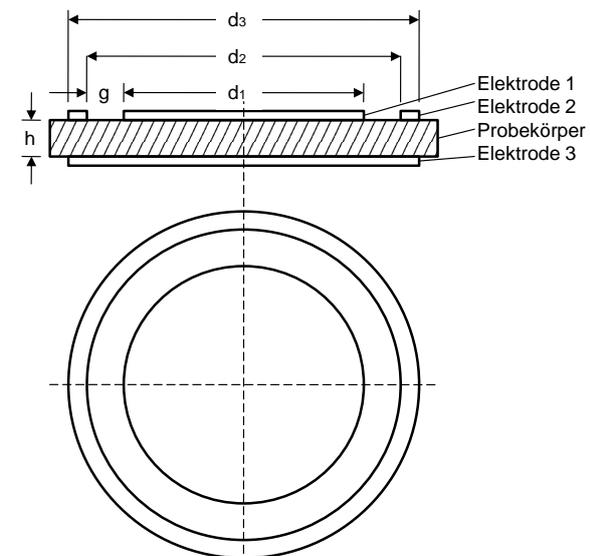


Bild 1 Elektrodenanordnung nach IEC 60093

Es wird empfohlen, dass die Spaltbreite g mindestens der doppelten Dicke des Probekörpers h entspricht. Außerdem sollte d_1 mindestens das Zehnfache von h betragen, damit der Einfluss des Durchgangswiderstands auf die Messung reduziert wird. Durch den Probekörper fließender Strom wird über Elektrode 3 abgeleitet und erreicht somit Elektrode 2 nicht. [5]

Aus den Abmessungen der Anordnung lässt sich der für Formel (2) benötigte effektive Elektrodenumfang p mit Formel (3) bestimmen.

$$p = \pi \cdot (d_1 + g) \quad (3)$$

mit:

- p effektiver Elektrodenumfang
- d_1 Durchmesser Elektrode 1
- g Abstand zwischen Elektroden

Weiterhin werden verschiedene Elektrodenwerkstoffe genannt. Die Elektroden sollen gut anbringbar sein, sich gut mit dem Probekörper verbinden und korrosionsbeständig unter den Prüfbedingungen sein. Deshalb hängt es vom Probekörper ab, welche Elektroden geeignet sind. [5]

IEC 60079-0 Explosionsschutz Allgemein

Laut IEC 60079-0 sollen die Elektroden nach **Bild 2** auf einer rechteckigen Platte oder dem Gehäuse angebracht werden. Die Elektroden sollen aus leitfähiger Farbe bestehen. [7]

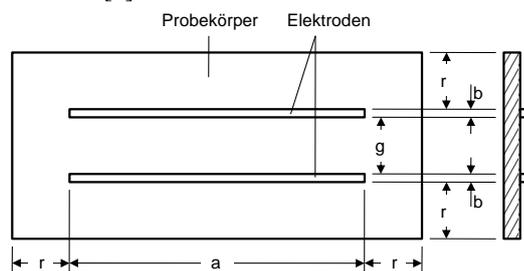


Bild 2 Elektrodenanordnung nach IEC 60079-0

Weiterhin sind die in **Tabelle 2** angegebenen Abmessungen für die Elektroden einzuhalten.

Bezeichnung	a	b	g	r
Abmessung in mm	100±1	≥ 1	10±0,5	≥ 25

Tabelle 2 Abmessungen Elektrodenanordnung IEC 60079-0

Aus den Abmessungen der Anordnung lässt sich der für Formel (2) benötigte effektive Elektrodenumfang p mit Formel (4) bestimmen. [5]

$$p = 2 \cdot (a + b + 2g) \quad (4)$$

mit:

- p effektiver Elektrodenumfang
- a Länge der Elektroden
- b Breite der Elektroden
- g Abstand zwischen Elektroden

IEC 60079-32-2 Explosionsschutz Elektrostatik

Nach IEC 60079-32-2 soll auch die Elektrodenanordnung nach Bild 2 mit Abmessungen nach Tabelle 1 verwendet werden. Falls der Probekörper nicht homogen ist, kann auch eine Anordnung ähnlich zu Bild 1 verwendet werden. Weitere Details zu dieser Anordnung finden sich in der hier nicht betrachteten DIN EN 61340-2-3. Die Elektroden sollen aus leitfähiger Farbe oder weichem, leitfähigem Gummiband sein. Werden Elektroden aus Gummiband verwendet, müssen sie mit jeweils 20 N auf den Probekörper gepresst werden. [8]

3.3 Messung

Für die direkte Messung des Oberflächenwiderstands werden eine Spannungsquelle und ein Strommessgerät benötigt. Der Oberflächenwiderstand kann auch indirekt über den Abgleich einer Wheatstone-Brücke bestimmt werden, diese Methode wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

IEC 60093 Prüfverfahren Elektroisolierstoffe

Die IEC 60093 schreibt vor, dass die geschützte Elektrode 1 über das Strommessgerät mit der Masse, die ungeschützte Elektrode 2 mit der Spannungsquelle und die Schutzelektrode 3 mit Masse verbunden wird. Die Zuordnung der Elektroden kann Bild 1 entnommen werden, den Messaufbau zeigt **Bild 3**.

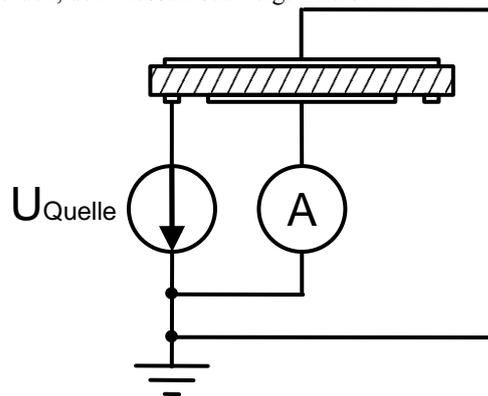


Bild 3 Messschaltung nach IEC 60093

Die Spannungsquelle muss in der Lage sein eine sehr konstante Gleichspannung zu liefern. Als Prüfspannungen können 100 V, 250 V, 500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V, 10000 V und 15000 V verwendet werden. Eine Minute nachdem die Spannung angelegt wurde, soll der Messwert abgelesen werden, da der Oberflächenwiderstand Zeitabhängig ist und sich erst einstellen muss. Das Ablesen soll auch stattfinden, wenn Ausgleichsvorgänge noch nicht abgeschlossen sind. [5]

IEC 60079-0 Explosionsschutz Allgemein

Nach IEC 60079-0 wird zwischen den beiden Elektroden eine Gleichspannung angelegt, der fließende Strom gemessen und der Widerstand angegeben. Dies zeigt **Bild 4**.

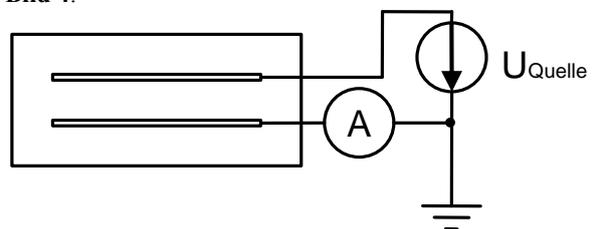


Bild 4 Messschaltung nach IEC 60079-0

Die Spannung soll (500±10) V betragen und die Messung soll (65±5) s nach dem Anlegen der Spannung erfolgen. [7]

IEC 60079-32-2 Explosionsschutz Elektrostatik

Der Messaufbau nach IEC 60079-32-2 gleicht dem der IEC 60079-0 in Bild 4. Um die Elektroden vor Zerstörung durch zu große Ströme zu schützen, soll zuerst mit einer kleinen Spannung von 10 V nach (15±5) s gemessen werden. Ist der sich ergebende Widerstand größer als 1 MΩ, soll mit größeren Spannungen nach **Tabelle 3** erneut gemessen werden. Es muss aber sichergestellt sein, dass keine Überschläge durch zu große Spannung zwischen den Elektroden stattfinden.

R_O in MΩ	U in V	Messzeit in s
≥ 1	100±5	15±5
≥ 10	500±25	65±5
≥ 100	500±25 oder 1000±50	65±5

Tabelle 3 Messspannungen nach IEC 60079-32-2

Bei sehr großen Widerständen > 100 MΩ werden noch höhere Spannungen um 10 kV empfohlen. Hierbei muss wieder beachtet werden, dass keine Überschläge stattfinden dürfen. Es sind mindestens 3 Messungen durchzuführen. Falls die Ergebnisse um mehr als 10 % voneinander abweichen, sollen 9 Messungen durchgeführt werden. [8]

3.4 Ermittlung des Oberflächenwiderstands

Aus den Messwerten lässt sich nach Formel (5) der Oberflächenwiderstand bestimmen. Es gibt Messgeräte, die die Berechnung intern durchführen und nur den Widerstandswert ausgeben.

$$R_O = \frac{U_{Quelle}}{I_{Mess}} \quad (5)$$

mit:

- R_O berechneter Oberflächenwiderstand
- U_{Quelle} Spannung der Quelle
- I_{Mess} gemessener Strom

Mit den Formeln (2), (3) und (4) lässt sich daraus der spezifische Oberflächenwiderstand berechnen. Es ergeben sich Formel (6) für die IEC 60093 und Formel (7) für die IEC 60079-0 und IEC 60079-32-2.

$$\sigma = \frac{U_{Quelle}}{I_{Mess}} \cdot \frac{\pi \cdot (d_1 + g)}{g} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{U_{Quelle}}{I_{Mess}} \cdot \frac{2 \cdot (a + b + 2g)}{g} \quad (7)$$

mit:

- σ spezifischer Oberflächenwiderstand
- U_{Quelle} Spannung der Quelle
- I_{Mess} gemessener Strom
- d_1 Durchmesser Elektrode 1
- g Abstand zwischen Elektroden
- a Länge der Elektroden
- b Breite der Elektroden

Auf Basis des spezifischen Oberflächenwiderstands lassen sich verschiedene Werkstoffe vergleichen.

4 Zusammenfassung/Fazit

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Prüfvorschriften auf unterschiedliche Anwendungsbereiche zugeschnitten sind.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Unterschiede der einzelnen Prüfvorschriften.

IEC 60093	IEC 60079-0/60079-32-2
3 Elektroden	2 Elektroden
Konditionierung nach Werkstoffnorm	Vorgabe von Temperatur und Luftfeuchtigkeit
freie Wahl der Abmessungen	vorgegebene Abmessungen
Spannungen bis 15 kV	Spannungen bis 1 kV

Tabelle 4 Vergleich IEC 60093 und IEC 60079-0/60079-32-2

Die IEC 60093 eignet sich nur für bestimmte Probekörper, da zwei Seiten des Probekörpers für die drei Elektroden erforderlich sind. Allerdings werden Volumeneffekte durch die Verwendung einer dritten Elektrode reduziert und die Genauigkeit der Messung somit verbessert.

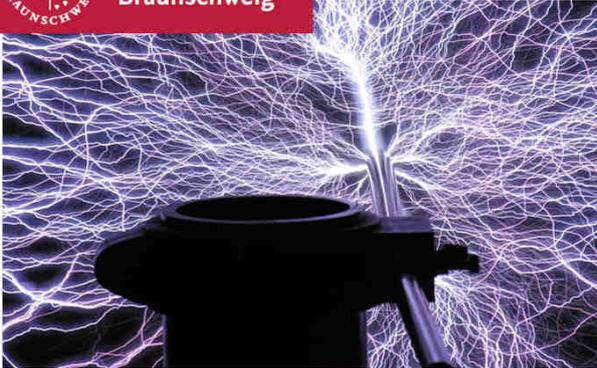
Die IEC 60079-0 und 60079-32-2 sind besser für Messungen direkt am Anwendungsort oder am Endprodukt geeignet, da nur zwei Elektroden auf einer Oberfläche benötigt werden. Die Messung ist durch Volumeneffekte ungenauer, jedoch praktikabler, da weniger Elektroden benötigt werden.

Durch unterschiedliche Messverfahren sind die Ergebnisse zwischen den Normen nicht vergleichbar. In Zukunft könnte untersucht werden, ob sich die Normen angleichen lassen, um eine gemeinsame Vergleichsbasis zu schaffen.

5 Literatur

- [1] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl, Hochspannungstechnik – Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1986.
- [2] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Grundprinzipien des Explosionsschutzes. [Online]. Available: <http://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt3/exschutz/ex-grundlagen/grundprinzipien-des-explosionsschutzes.html> [Zugriff am 30.04.2017].
- [3] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 1112 Teil 1 „Explosionsgefährdungen bei und durch Instandhaltungsarbeiten – Beurteilung und Schutzmaßnahmen“. [Online]. Available: https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRBS/pdf/TRBS-1112-Teil-1.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff am 28.04.2017].
- [4] A. Küchler, Hochspannungstechnik – Grundlagen – Technologie – Anwendungen, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005.
- [5] Internationale Elektrotechnische Kommission, DIN IEC 60093 Prüfvorschriften für Elektroisierstoffe, Brüssel, 1993.

- [6] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS 727 „Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen“, Dortmund 2016.
- [7] Internationale Elektrotechnische Kommission, IEC 60079-0 Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 0: Betriebsmittel – Allgemeine Anforderungen, Brüssel 2013.
- [8] Internationale Elektrotechnische Kommission, IEC 60079-32-2 Explosionsgefährdete Bereiche – Teil 32-2: Elektrostatische Gefährdungen – Prüfverfahren, Brüssel 2015



Normative Isolierstoffcharakterisierung in der Hochspannungstechnik und im Explosionsschutz

Niklas Rühmann, 05.07.2017

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisolierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche, Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung



(forschung-stromnetze.info)

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisolierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung



(forschung-stromnetze.info)

Isolierstoffe

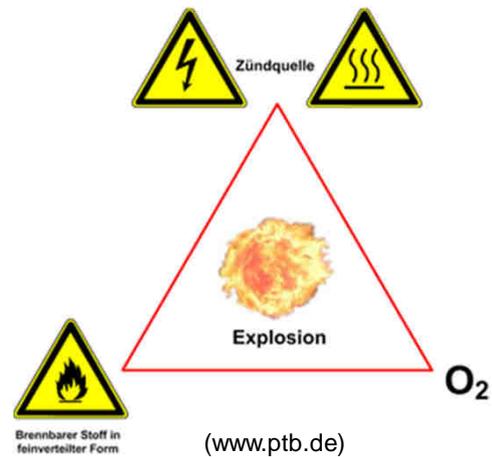
- Elektrische Potentiale sicher trennen
- Mechanische und chemische Stabilität
- Langlebigkeit
- Normierte Werkstoffprüfungen zur Überprüfung der Konformität an Anforderungen
- Durchgangswiderstand
- Oberflächenwiderstand



(forschung-stromnetze.info)

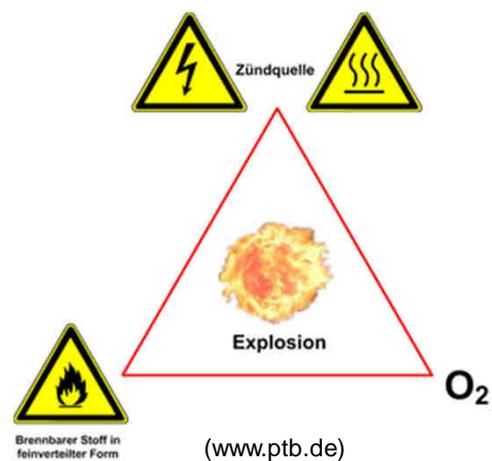
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung



Explosionsschutz

- Explosionen benötigen drei Komponenten:
 - Sauerstoff
 - Zündquelle
 - Fein verteilter, brennbarer Stoff
- => Eine Komponente entfernen
- Zündquellen:
 - Statische Aufladung
 - Entladungen
 - Feldstärkeüberhöhung
 - Kriechströme
- => Aufbringen der Mindestzündenergie



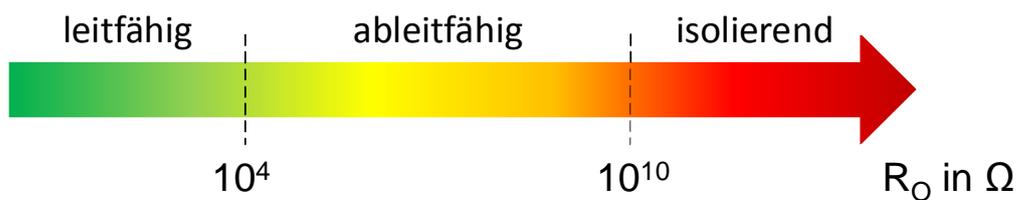
Oberflächenwiderstand – Allgemein und in der Hochspannungstechnik

- Kriechströme durch falsche Auslegung
- Abhängigkeiten:
 - Temperatur
 - Feuchtigkeit
 - Beanspruchungsdauer
 - Fremdschichten, z.B. Verschmutzung



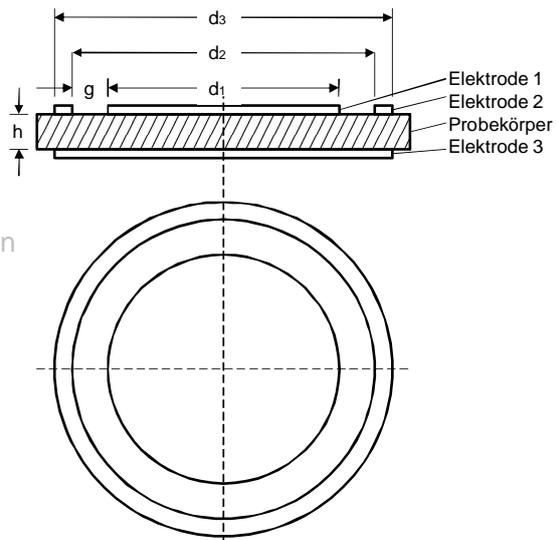
Oberflächenwiderstand

- Verschiedene Messverfahren
 - Direkte/indirekte Messung
 - Elektrodenwerkstoff
 - Elektrodenanordnung
- Spezifischer Oberflächenwiderstand aus Geometrie
- Einordnung in drei Klassen



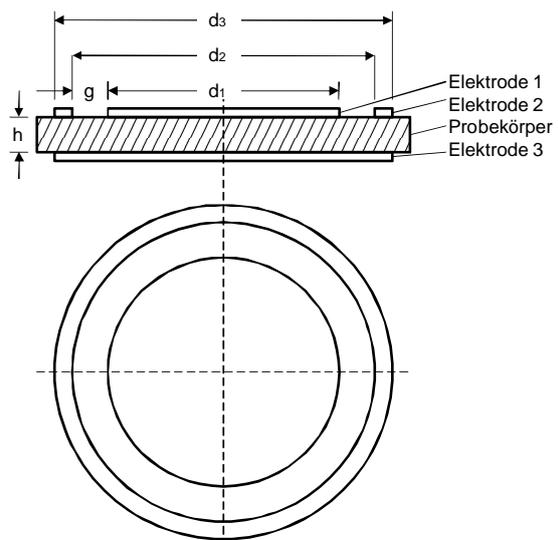
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung



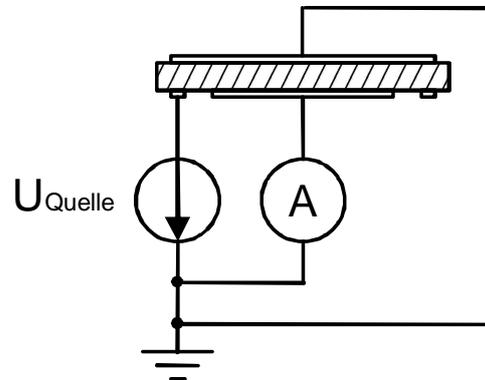
Prüfverfahren für Elektroisierstoffe (IEC 60093)

- Konditionierung nach Werkstoffnorm
- Drei Elektroden (Schutzringanordnung)
 - 1: Geschützte Elektrode
 - 2: Ungeschützte Elektrode
 - 3: Schutzelektrode
- Verringerung von Volumeneffekten
- Empfehlung: $g > 2h$, $d_1 \geq 10h$



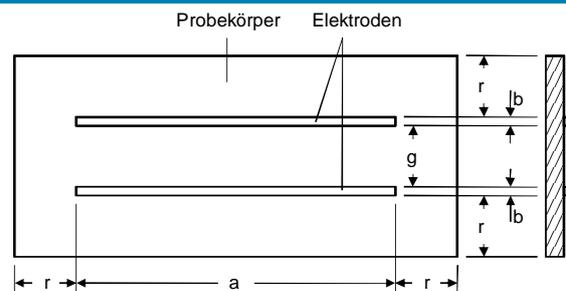
Prüfverfahren für Elektroisierstoffe (IEC 60093)

- Sehr konstante Gleichspannungsquelle
- Strommessgerät für Oberflächenstrom
- Prüfspannungen 100 V bis 15 kV
- Messung 60 s nach anlegen der Spannung



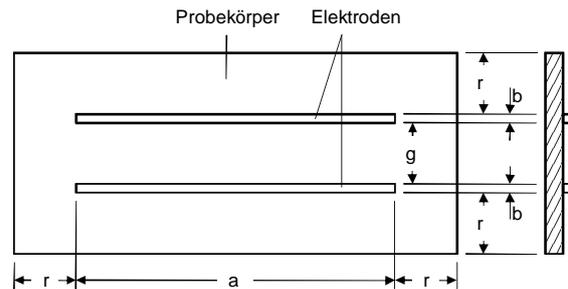
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung



Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren (IEC 60079-0, IEC 60079-32-2)

- Zwei Elektroden
- Vorgaben für a , b , g und r

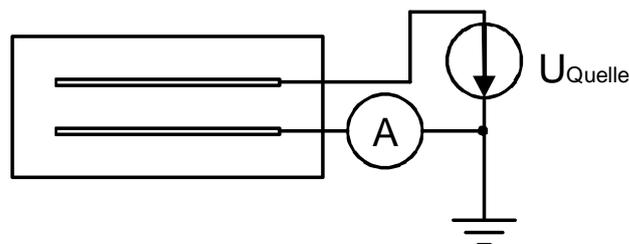


IEC 60079-0	IEC 60079-32-2
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 24 h bei 23 ± 2 °C und 30 ± 5 % oder 50 ± 5 % Luftfeuchtigkeit ▪ Leitfähige Farbe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 24 h bei 23 ± 2 °C und 25 ± 5 % Luftfeuchtigkeit ▪ Eventuell lokale Bedingungen ▪ Leitfähige Farbe oder weiches leitfähiges Gummi

Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren (IEC 60079-0, IEC 60079-32-2)

- Spannungsquelle und Strommessgerät

IEC 60079-0	IEC 60079-32-2
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfspannung 500 ± 10 V ▪ Messung 65 ± 5 s nach anlegen der Spannung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schrittweise Steigerung der Prüfspannung von 10 V bis 1000 ± 50 V ▪ Messung 15 ± 5 s oder 65 ± 5 s nach anlegen der Spannung



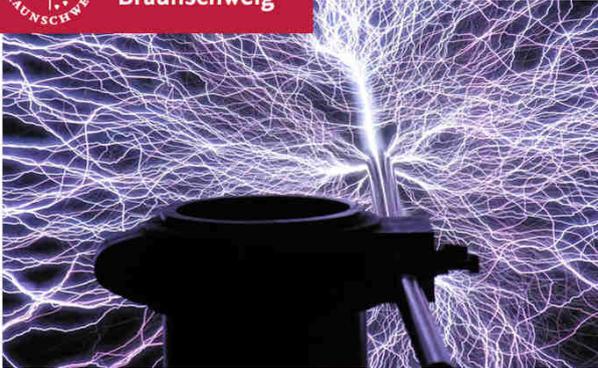
Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Prüfverfahren für Elektroisolierstoffe
- Explosionsgefährdete Bereiche: Anforderungen und Prüfverfahren
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

Elektroisolierstoffe	Explosionsschutz
<ul style="list-style-type: none">▪ 3 Elektroden▪ Konditionierung nach Werkstoffnorm▪ freie Wahl der Abmessungen▪ Spannungen bis 15 kV	<ul style="list-style-type: none">▪ 2 Elektroden▪ Vorgabe Temperatur und Luftfeuchtigkeit▪ vorgegebene Abmessungen▪ Spannungen bis 1 kV

- IEC 60093 nur bei bestimmten Probekörpern anwendbar
- IEC 60079-0 und IEC 60079-32-2 in mehr Fällen anwendbar
- Ergebnisse bei Normwechsel nicht vergleichbar
- zukünftig Angleichung der Normen untersuchen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Frequenzganganalyse von Leistungstransformatoren

Frequency Response Analysis of Power Transformers

Saeed Ghorbanpour Besheli, B.Sc. Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, s.ghorbanpour-besheli@tu-bs.de

Kurzfassung

Leistungstransformatoren sind der zentrale Knotenpunkt in der elektrischen Energieverteilung und Energieübertragung. Entsprechend entscheidend ist ihr Zustand für einen zuverlässigen störungsfreien Betrieb. Aus diesem Grund spielt der Zustand der Transformatoren eine sehr wichtige Rolle. Mit Hilfe des Frequenzganges von Leistungstransformatoren werden mögliche mechanische und elektrische Fehler oder Schädigung der Transformatorbauelemente erkannt. Dies können wie z.B. sein: durch Durchschläge von Wicklungen, Verformungen von Kernen oder Teilentladungen in Durchführung. „Frequency Response Analysis (FRA)“ - Frequenzganganalyse ist eine leistungsstarke Diagnosetechnik, die weit verbreitet ist, um interne Fehler in den Transformatoren zu identifizieren. Diese Technik soll in diesem Bericht vorgestellt werden.

Abstract

Power transformers are the central node in electrical energy distribution and transmission. Their condition is therefore crucial for reliable, trouble-free operation. For this reason, the condition of the transformer elements is a very necessary part. With the aid of the Frequency Response Analysis (FRA) of power transformers, possible mechanical and electrical Failure of the transformer elements such as, for example, winding discharges, deformation of cores and failures in Bushing will be identify. FRA is a powerful diagnostic technique that is widely used to identify internal Failures in the transformers and this technique will be presented in this Paper.

1 Einleitung

In der Praxis werden Transformatoren oft vereinfacht und werden durch Hauptinduktivitäten und Widerstände dargestellt. Reale Transformatoren beinhalten darüber hinaus weitere parasitäre Elemente, die zusammen mit den Hauptkomponenten ein komplexes Netzwerk bilden.

Mithilfe des komplexen Ersatzschaltbildes und durch die frequenzabhängige Änderung der parasitären Eigenschaften ist es möglich durch eine Frequenzganganalyse verschiedene Verformungen und interne Fehler der Transformatoren zu bestimmen.

2 Theoretische Grundlagen

Es gibt mehrere Diagnosemethoden, die auf Transformatoren angewandt werden. Einige Fehler wie Transformator kernschäden, Wicklungsverschiebungen und andere mechanische Schäden sind im Allgemeinen mit den üblichen Methoden schwer zu erkennen [1]. Mittlerweile wird die Frequenzganganalyse (FRA) verwendet. Diese Methode ist hilfreich, um mechanische Verformung in den Transformatoren zu diagnostizieren. Wenn ein Fehler in der Wicklung auftritt, verändern sich die Transformatorparameter entsprechend und dadurch auch der Frequenzgang der Wicklung [1]. Die Frequenzganganalyse (FRA) erkennt diese Veränderungen durch die Parameteränderungen der Transformatoren bei unterschiedlichen Frequenzen. Im Laufe der Jahre gab es mehrere Methoden und Strategien, die von verschiedenen Wissenschaftlern angewandt und untersucht wurden. Diese Methoden sind, wie z.B.: akustische Vibration,

elektromechanische Kopplungsschwingung der Leistungstransformatoren unter Kurzschlussbedingungen und die Kurzschluss-Impedanz-Methode. [2]

Alle diese Methoden basieren auf bestimmtem Eingangssignal. In diesem Bericht wird die Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) behandelt. Mit Hilfe der oben genannten Methoden werden die Fehler wie z. B. Verluste des Klemmendrucks, innere Scheibenwicklungsfehler, Kurzschlussfehler und viele andere erkannt.

3 Reale Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren

Leistungstransformatoren verfügen über einen aus Kernblech geschichteten Kern und Wicklungen, die als Zylinderwicklung oder als Scheibenwicklung übereinander angeordnet sind [1]. Der Transformator kann als ein Netzwerk, bestehend aus Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten mit einem magnetischen Kreis, der im Wesentlichen aus einem Eisenkern besteht, betrachtet werden. Abb. 1 zeigt das prinzipielle einphasige Ersatzschaltbild eines Leistungstransformators mit 10-Scheibenwicklung [1]. Jede Scheibe besteht aus einem Reihenwiderstand (R_s) und einer Induktivität (L_s). Diese Hauptelemente des Leistungstransformators sind parallel zu einem Kondensator (C_{sh}) und einem Leitwert (G_{sh}) [1]. Die Kapazität (C_{hl}) zwischen den HV- und LV-Wicklungen (High Voltage und Low Voltage Winding) und sind durch eine dielektrische Leitfähigkeit (G_{hl}) verbunden [1]. Die gegenseitige Kopplung einzelner Windungen (M_{ij}) sind zwischen den Windungen i und j

angeschlossen. Die dielektrische Isolierung (Öl) zwischen der LV-Wicklung und dem Kern und der HV-Wicklung und dem Tank, wurde durch eine Kapazität (C_g) und eine dielektrische Leitfähigkeit (G) dargestellt [1].

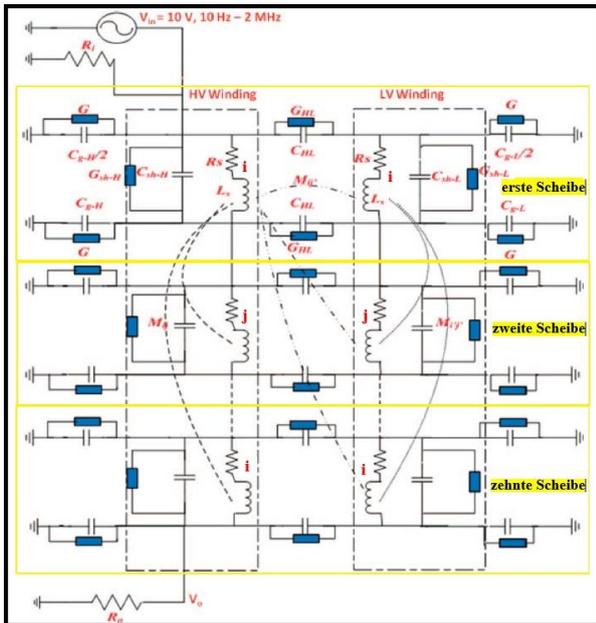


Abb. 1 Einphasiges 10-Scheiben Modell eines Leistungstransformators [1]

3.1 Transformator-Modell-Analyse

In der Tabelle 1 sind die mechanischen Fehler, die Transformatorbauelemente beeinflussen können, gezeigt. Mit Hilfe der Frequenzganganalyse werden die Änderungen des Betrags und der Dämpfungsamplitude der Frequenz von diesen Parametern erkannt und dadurch werden die mechanischen Fehler von Kern oder Wicklungen ermittelt.

Tabelle 1: Modellparameter und die mechanischen Fehler, die sie beeinflussen	
Induktivität (L_s)	Scheibenverformung, lokaler Zusammenbruch, Kern- und Wicklungsverformung durch Kurzschlüsse
Parallele Kondensator (C_{sh})	Scheibenbewegungen, Knickung durch große mechanische Kräfte, Feuchtigkeitseintritt und Verlust des Klemmdrucks
Reihenkapazität (C_{hl})	Alterung der Isolierung, Feuchtigkeitseintritt und Scheibenbewegung
Reihenwiderstand (R_s)	Kurzgeschlossene oder gebrochene Scheibe, Kontaktverschleiß

Tabelle 1 Modellparameter und die mechanischen Fehler[1]

4 Frequenzganganalyse

Grundsätzlich werden zwei verschiedene Messmethoden für die Frequenzganganalyse verwendet:

1. Die Übertragungsfunktionsmessung im Frequenzbereich SFRA (Sweep Frequency Response Analysis)
2. Die Übertragungsfunktionsmessung im Zeitbereich IFRA (Impulse Frequency Response Analysis)

Die beiden Verfahren verwenden ein sinusförmiges Niederspannungssignal mit einer variablen Frequenz, die

in den einen Eingangs- bzw. Phasenanschluss einer HV-Wicklung eingespeist wird. Das Antwortsignal wird an dem jeweilig anderen Ausgangs- bzw. Phasenanschluss gemessen. Diese Verfahren kann auch durch LV-Wicklungen durchgeführt werden. [3]

4.1 Die IFRA

Bei der IFRA wird der Transformator mit einer breitbandigen Impulsspannung angeregt. Entsprechend der Impulsantwort des Transformators wird am Ausgang ein Antwortsignal zu messen sein. Beide Signale werden simultan mit einem Transientenrekorder erfasst, und unter Verwendung der FFT (Fast Fourier Transformation) numerisch in den Frequenzbereich transformiert. Durch die anschließende Quotientenbildung zwischen dem fouriertransformierten Ausgangs- und Eingangssignal erhält man die ÜF (Übertragungsfunktion). Signalerfassung und -verarbeitung haben bei diesem Messverfahren einen maßgeblichen Einfluss auf die ÜF. [3]

4.2 Die SFRA

In den letzten Jahren hat sich die SFRA durchgesetzt, da beim SFRA Verfahren die Übertragungsfunktion direkt im Frequenzbereich nach dem Prinzip eines Netzwerkanalysators gemessen wird. Beim SFRA Verfahren wird an einem Anschluss eines freigeschalteten und vom Netz getrennten Leistungstransformators ein frequenzveränderliches Sinussignal zwischen 10 Hz und 1 MHz mit einer bekannten niedrigen Spannung z.B. 10 V eingespeist und mittels eines Sensors an einem anderen Anschluss das Signal ausgekoppelt und gemessen [4]. Dadurch lässt sich die Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators im Frequenzbereich in Betrag und Phase zwischen zwei Anschlüssen ermitteln. Anschließend wird dieses Ausgangssignal mit einer Referenzkurve, die von einem nicht fehlerhaften Transformator gemessen wird, verglichen. Jede große Änderung in Amplitude und Phasenlage zeigt einen bestimmten Fehler im Transformator an.

4.3 Messtechnische Verfahren

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich wird das Testobjekt, wie in Abb. 2 abgebildet, mit einer sinusförmigen Spannung angeregt [5]. Dadurch lässt sich die Übertragungsfunktion eines Leistungstransformators im Frequenzbereich in Betrag und Phase zwischen zwei Anschlüssen ermitteln [1]. Abb. 2 zeigt das prinzipielle Ersatzschaltbild einer Messung zwischen Phasenanschluss 1U und der Erde an einem Leistungstransformator und LV- Wicklung ist im Leerlauf.

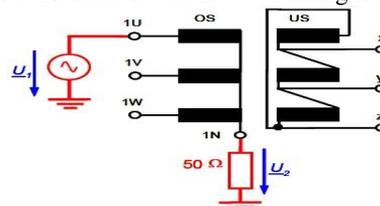


Abb. 2 Ersatzschaltbild der SFRA-Messung [4]

Für eine gesicherte Interpretation der Messergebnisse muss bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse gewährleistet sein. Beim Messaufbau sind insbesondere die Messkabelführung, die Erdungsverhältnisse und die Anschlusstechnik von Bedeutung. Es gibt verschiedene Arten von Anschlussverbindungen, die angewandt und untersucht werden. Aufgrund der großen Abmessungen der Leistungstransformatoren werden in der Regel bis zu 30m lange Koaxialkabel zur Signalübertragung von den Anschlussklemmen des Transformators bis zum Messgerät eingesetzt, siehe Abb. 3. [4]

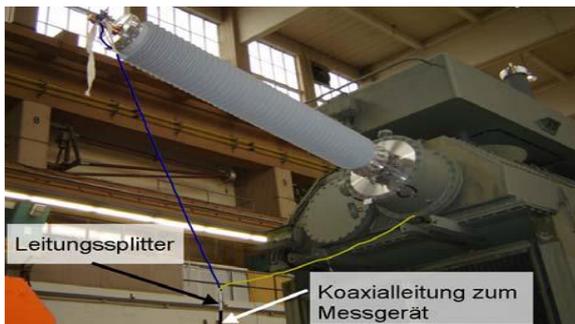


Abb. 3 Kabelanordnungen der Frequenzgangmessung [4]

Bild 4 zeigt den Anschluss des Messkopfes am Bolzen der Durchführung und die Verlegung des Erdungsbands entlang einer 400 kV-Durchführung. Im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass ein breites, feinadriges Aluminiumgeflechtband zur Verbindung der Messerdnen mit dem Kessel einen akzeptablen Kompromiss zwischen Kosten, Gewicht und Nutzen darstellt. Die Verlegung der Erdung unmittelbar entlang der Freiluftdurchführung des Transformators und eine Verbindung mit dem Transformator-kessel unmittelbar am Fußpunkt der Durchführung führen hier zu guten Ergebnissen des Frequenzganges. [4]



Abb. 4 Ankopplung des Messsystems und Anschluss der Messerde an eine 400 kV-Durchführung [4]

4.4 Auswirkende Transformatorparameter in verschiedenen Frequenzbereiche

Im Abb. 5 ist ein typischer Verlauf der Amplitude im Frequenzbereich von einem Leistungstransformator dargestellt, der die Auswirkungen der Transformatorbauelemente zeigt. Der Frequenzbereich FB1 zeigt das induktive Verhalten, welches durch die

Hauptfeldinduktivität (L_s) hervorgerufen wird, während die Resonanzen in den Bereichen FB2 und FB3 das Frequenzverhalten der Schwingkreise aus Streuinduktivität und Serien- bzw. Erdkapazität (C_g) der Wicklungen widerspiegeln [5]. Die gegenseitige Kopplung einzelner Windungen (M_{ij}) sowie gesamter Wicklungsröhren wird in dem Frequenzbereich FB4 beschrieben. Im FB5 werden sowohl die Kopplungen von FB4 als auch das Frequenzverhalten der Zuleitung und Messkabel abgebildet. Mit zunehmender Frequenz wirkt sich die Frequenzgang der Zuleitung und des Messaufbaus immer stärker auf die Übertragungsfunktion des Gesamtsystems aus. Die Auswirkungen des Kerns lassen sich ausschließlich im Frequenzbereich unterhalb 10 kHz finden. Unterschiedliche Magnetisierungszustände können zu Veränderungen des Frequenzganges in diesem Bereich führen. [5]

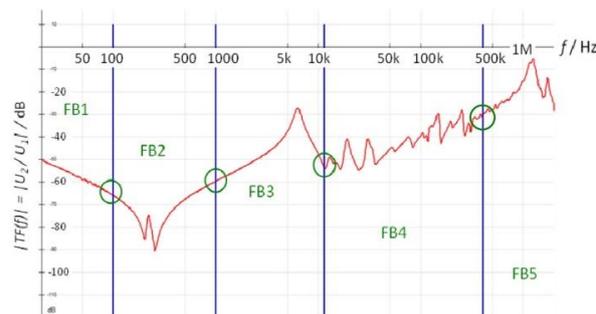


Abb. 5 Typische Verläufe des betragsmäßigen Frequenzganges [5]

5 Fehler Analyse

Die Empfindlichkeit der FRA-Signatur wurde zur Variation der Modell Parameter untersucht. In der Simulation ist eine sinusförmige Erregungsspannung und variabler Frequenz mit einem Wicklungsanschluss verbunden [1]. Die Antwort wird an dem anderen Anschluss der Wicklung aufgezeichnet (Abb. 2) [1]. Klare Anzeichen für die elektrischen oder mechanischen Veränderungen am Aktivteil eines Transformators sind die in engeren Frequenzgrenzen gefassten Dämpfungsunterschiede und die Verschiebungen von Resonanzen. Zusätzliche Resonanzen oder deren Verschwinden entstehen in Bezug auf die Referenzkurve [5].

5.1 FRA Messung an nicht fehlerhaften Transformator

Die FRA-Messung wurde an 11 / 0,433 kV, 1000VA Transformator durchgeführt [3]. Die Ergebnisse der elektrischen Prüfungen zeigen, dass der Transformator basierend auf der grafischen Analyse, der mechanischen Struktur und der Wicklungsanordnungen in einem nicht fehlerhaften Zustand war. Es gibt mehrere Spitzenpunkte, Resonanzen und Anti-Resonanzen, aber keine signifikanten Änderungen in der FRA-Antwort zwischen den Phasen des Transformators [6]. Diese Kurve im Abb. 6 wird als Referenzkurve der Fehlererkennung verwendet.

Im Idealfall wird eine Referenzkurve (Fingerabdruck) von jeder Wicklung zu einem Zeitpunkt genommen, als der Transformator bekanntermaßen in gutem Zustand war. Ist die Kurve identisch, ist intern kein mechanischer Versatz aufgetreten.

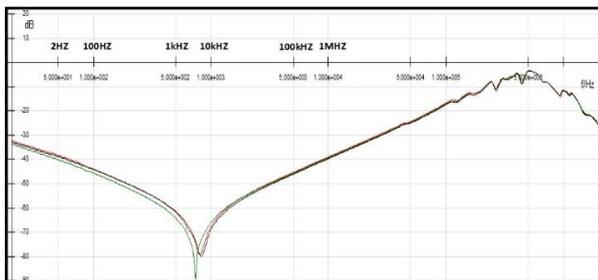


Abb. 6 FRA Muster des nicht fehlerhaften Transformators [7]

5.2 FRA Messung an fehlerhaften Transformator

Ein Verteiltransformator 11 / 0,433 kV wurde, aufgrund eines Kurzschlussfehlers während des Betriebs, betrachtet. Die FRA Messung wurde durchgeführt, um die mechanischen Fehler der Transformatorelemente zu bestimmen. Im Abb. 7 ist zu sehen, dass es eine kleine Abweichung im FRA-Muster bei einer Frequenz unter 2 kHz und einer Frequenz über 100 kHz gibt. Die Abweichung im unteren Frequenzbereich ist aufgrund der Magnetisierung des Kerns zurückzuführen. Die Änderungen im FRA-Muster bei höheren Frequenzbereichen zeigen die Verformung am Wicklungsaufbau an. [7]

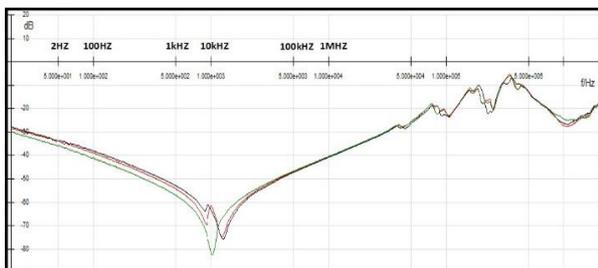


Abb. 7 FRA Muster des fehlerhaften Transformators [7]

5.3 Innere Scheibenwicklungsfehler

Der innere Scheibenwicklungsfehler ist einer der häufigsten mechanischen Störungen innerhalb der Leistungstransformatoren und etwa 80% der Ausfälle sind darauf zurückzuführen. Es ist aufgrund von Änderungen im axialen Scheibenraum, der durch überschüssige mechanische Kurzschlussfehler zwischen den Windungen verursacht wird [1]. Δh im Abb. 6 zeigt den Abstand zwischen den fehlerhaften HV-Windungen. Es kann durch die Erhöhung der Serienkapazität (C_{sh}) und die gegenseitige Induktivität (M_{ij}) zwischen den beiden relevanten Platten simuliert werden [1]. Abb. 8 zeigt diesen Fehler.

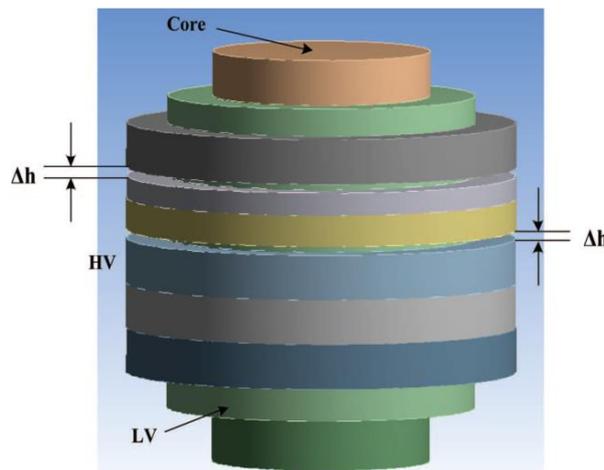


Abb. 8 Innere Scheibenwicklungsconfiguration [1]

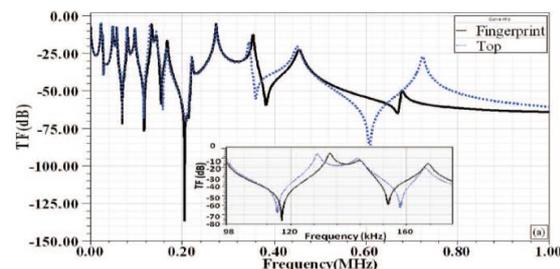


Abb. 9 FRA Kurve von HV-Wicklung mit inneren Scheibenwicklungsfehler [1]

Abb. 9 zeigt, dass dieser Fehler keinen signifikanten Effekt auf der FRA Signatur bei Frequenzen unter ca. 300 kHz hat [1].

5.4 Axialer Verschiebungsfehler

Dieser Fehler tritt aufgrund der Erzeugung von unausgeglichenen magnetischen Kräften auf eine Wicklung als Folge eines Kurzschlussfehlers auf. Diese Kräfte verursachen eine axiale Bewegung der HV- oder LV-Wicklung. Der Fehler kann durch Änderung der Werte der Serie Kapazität (C_{sh}) und gegenseitige Induktivität (M_{ij}) zwischen der HV- und LV-Wicklungen simuliert werden. [1]

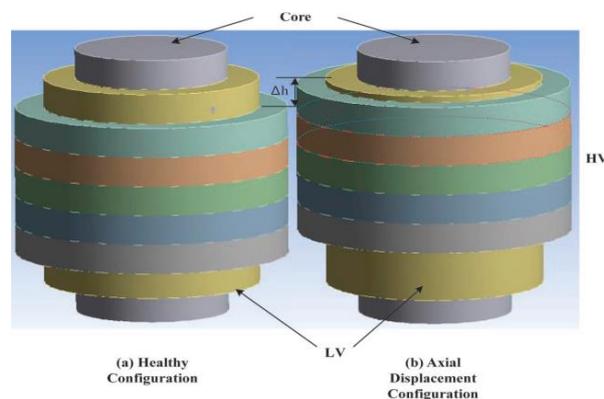


Abb. 10 Axiale Verschiebung (Δh) Konfiguration [1]

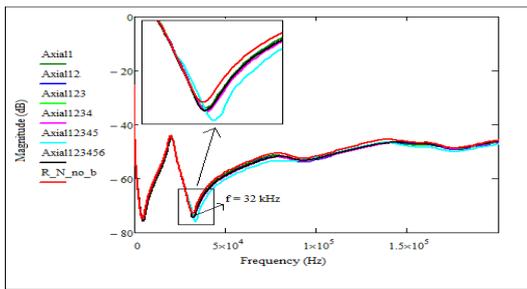


Abb. 11 FRA Kurve von einem Transformator mit axialer Wicklungsverschiebung [6]

Die FRA-Kurven in Abb. 11 zeigen, dass keine Effekte bei niedriger Frequenz aufgetreten, da diese erst bei mittlerer Frequenz entstehen [6].

Radialverdrängungsfehler

Wicklungen können durch radiale Kräfte der Wechselwirkung des Wicklungsstroms mit dem magnetischen Fluss beeinflusst werden. Dieser Fehler kann durch Verringerung der Kapazität zwischen den HV- und LV-Wicklungen (C_{hi}) und die gegenseitige Induktivität (M_{ij}) an den betroffenen Scheiben simuliert werden [1]. Abb. 13 zeigt FRA-Kurven von einem Transformator mit einem großen Effekt von radialer Verschiebung der Wicklungen bei niedrigen und mittleren Frequenzen.

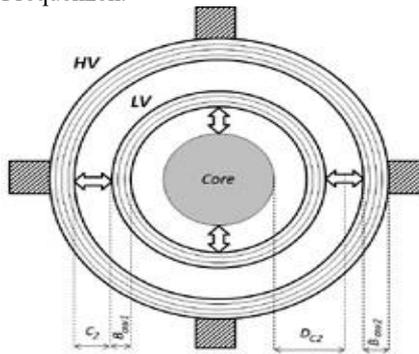


Abb. 12 Radialer Wicklungsverschiebung [6]

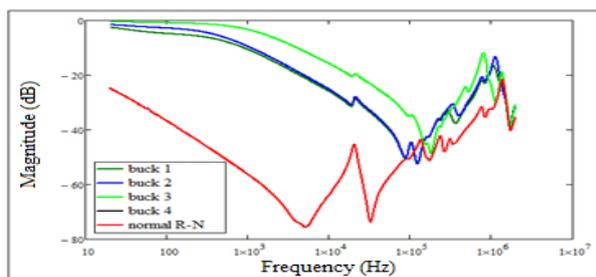


Abb. 13 FRA Kurve von einem Transformator mit radialer Wicklungsverschiebung [6]

5.5 Kurzschlussfehler

Dieser Fehler wird durch eine Schädigung der Wicklung oder der Isolierung des Leiters durch elektromechanische Kräfte verursacht [1]. Diese Schädigung kann einen übermäßigen Strom in der Wicklung führen. Der Fehler kann durch Kurzschließen des Widerstands (R_s) und die

Serieninduktivität (L_s), der HV-Wicklung, simuliert werden [1].

5.6 Dielektrische Leck Strom Fehler

Erdungsfehler, Öl- und Papieralterung, hohe Feuchtigkeit Inhalt in der Wicklung und Abrieb der festen Isolierung sind die Hauptursachen für Leck Strom zur Erdung durch Transformatorisolation. Diese Art von Fehler kann durch die Erhöhung der Leitfähigkeit zwischen der HV-Wicklung und dem Boden (G) simuliert werden. [1]

6 Zusammenfassung/Fazit

Frequenzganganalyse (FRA) ist einer der wichtigsten Diagnosewerkzeuge für die Zustandsbewertung von inneren Bauelementen in Leistungstransformatoren. Es ist eine Technik zur Erkennung der mechanischen Verschiebungen und Verformungen im Transformator Kern und in der Transformatorwicklung. Diese Fehler können durch Kurzschlussstörungen, Transport, Blitzeinschlag und anderen möglichen Störungen auftreten. Die Frequenzganganalyse kann durch zwei verschiedene Messverfahren durchgeführt werden: 1. direkt im Frequenzbereich (SFRA) 2. im Zeitbereich (IFRA). Mit Hilfe der Anregung des Transformators mit einem sinusförmigen Signal an einer Seite der Wicklung wird ebenfalls ein sinusförmiges Antwortsignal an der anderen Seite hervorgerufen. Dieses Ausgangssignal wird als eine Kurve im Frequenzbereich dargestellt. Nach dem Vergleich dieser Kurve mit einer Referenzkurve von einem nicht fehlerhaften Transformator werden die Verformungen, die Verschiebungen und viele andere mechanische Fehler der Transformatorelemente erkannt. Wie in Tabelle 1 gezeigt wird, ist jeder Parameter vom Leistungstransformator mit einem bestimmten Fehler im Zusammenhang. In Tabelle 2 werden die Fehler durch unterschiedliche Amplituden und Frequenzbereiche der FRA Kurven erkannt. Durch die Änderung der Transformatorbauelemente wie z. B. Kapazitäten, Leitwerte, Widerstände oder Induktivitäten können diese Fehler simuliert und untersucht werden.

Tabelle 2 Auswirkungen von verschiedenen Fehlern auf Transformator FRA Signatur ^[1]			
Fehlertyp	Frequenz Bereich		
	<20 kHz	20-400 kHz	>400 kHz
Axiale Verschiebung	Kein Effekt	Resonanzfrequenzen und Größe verringert	Resonanzfrequenzen und Größe erhöht
Radiale Verschiebung	Steigerung der Resonanzfrequenzen	Resonanzfrequenzen erhöht	Steigerung der Resonanzfrequenzen
Durchführung	Kein Effekt	Kein Effekt	Größe verringert sich, eine Resonanzfrequenz verschwindet
Dielektrischer Leck Strom	Verringerung der Größe	Verringerung der Größe	Kein Effekt
Interne Disk	Kein signifikanter Effekt	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht
Kurzschluss	Kein signifikanter Effekt	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht
Verlust des Klemmdrucks	Verringerung der Größe	Verringerung der Größe	Verringerung der Größe

7 Literatur

- [1] A. Abu-Siada, Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures, IEEE Paper, 2013.
- [2] Nnachi Gideon, Dan Valentin Nicolae, Diagnostic Methods of Frequency Response Analysis for Power Transformer Winding, IEEE Paper, 2016.
- [3] René Martin Wimmer, Die Ermittlung der Übertragungsfunktion von Großtransformatoren mittels On- und Offline-Messungen, Vorlesungsskripte, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, 2010
- [4] Christian Homagk, Thomas Leibfried, Praktische Aspekte bei der Messung der Übertragungsfunktion an Leistungstransformatoren, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [5] Maximilian Heindl, René Wimmer, Jochen Christian, FRA – Ein neuer Standard zur Wicklungsdiagnose, Stuttgarter Hochspannungssymposium, 2010
- [6] Suwarno and F. Donald, Frequency Response Analysis (FRA) for Diagnosis of Power Transformers, IEEE Paper, 2010.
- [7] Mohd Aizam Talib*, Nurul Atikah Saeidi, Wan Noraishah Wan Abdul Munim, Diagnosis of Winding Displacement in Power Transformer Using Frequency Response Analysis Technique, Langwaki, Malaysia, 2013



Frequenzganganalyse von Leistungstransformatoren

Saeed, Ghorbanpour Besheli, 05.07.2017

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Einleitung

- **Leistungstransformator**
 - Zentraler Knotenpunkt im Netz
 - Kostspieliges Bauelement
- **Anforderungen**
 - Zuverlässiger Betrieb und stabiler Zustand
 - Kontrolle bei Erwärmung
 - Kurzschlussfestigkeit der Wicklungen



[2]

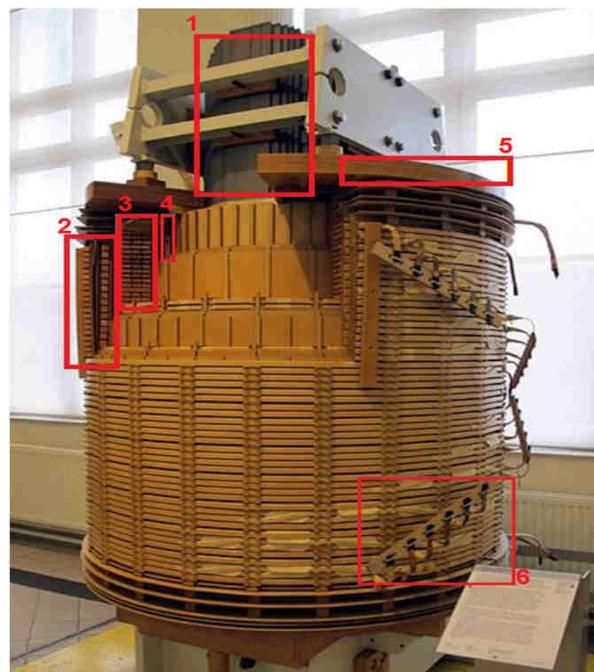
- **Schädigung oder Fehlererkennung
Mit Hilfe der Frequenzganganalyse**

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren

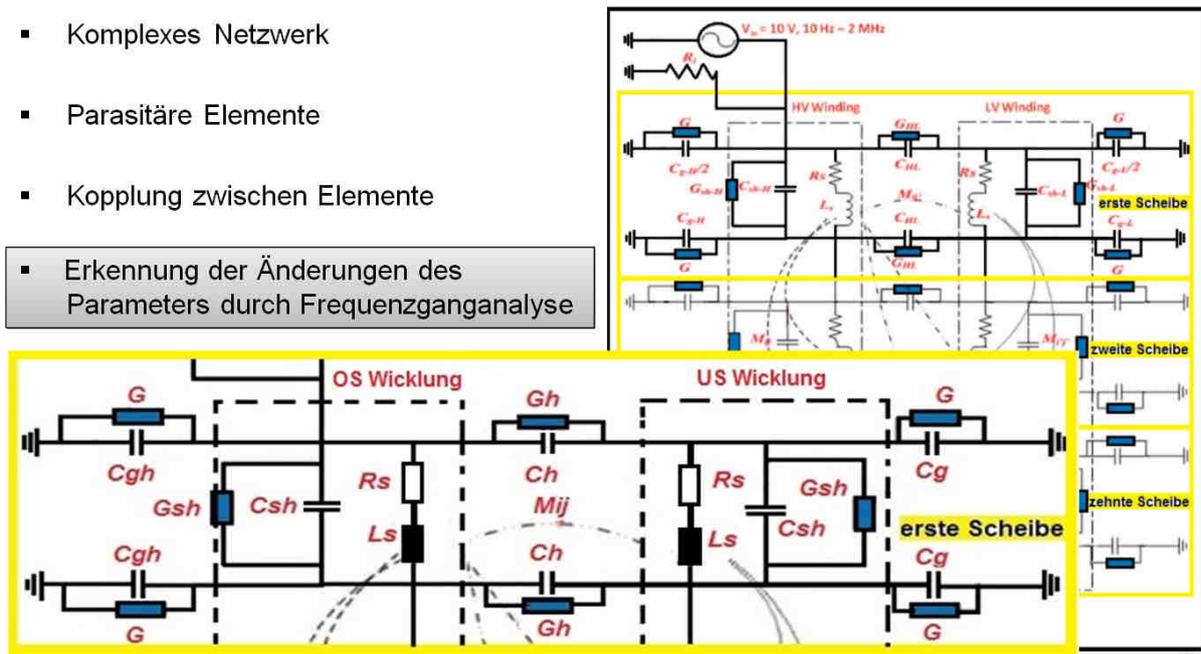
- Kern und Wicklungen als
Zylinderwicklung oder Scheibenwicklung
 - 1) Teil des Eisenkern, Schenkel
 - 2) Oberspannungswicklung
 - 3) Unterspannungswicklung
 - 4) Tertiärwicklung
 - 5) Abstandshalter
 - 6) Anschlüsse der Oberspannungsseite
zum Stufenschalter



[3]

Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren

- Komplexes Netzwerk
 - Parasitäre Elemente
 - Kopplung zwischen Elemente
- Erkennung der Änderungen des Parameters durch Frequenzganganalyse



[5]



05.07.2017 | Saeed Ghorbanpour Besheli | Frequenzganganalyse von Leistungstransformatoren | Seite 7



Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren

Induktivität (L_s)	Scheibenverformungen Lokaler Zusammenbruch Kern und- Wicklungsverformung
Paralleler Kondensator (C_{sh})	Scheibenbewegungen Knickung durch große Mechanische Kräfte Feuchtigkeitseintritt und Verlust des Klemmdrucks
Reihenkapazität (C_{hl})	Alterung der Isolierung Feuchtigkeitseintritt und Scheibenbewegung
Reihenwiderstand (R_s)	Kurzgeschlossene oder gebrochene Scheibe Kontaktverschleiß

[5]



05.07.2017 | Saeed Ghorbanpour Besheli | Frequenzganganalyse von Leistungstransformatoren | Seite 8

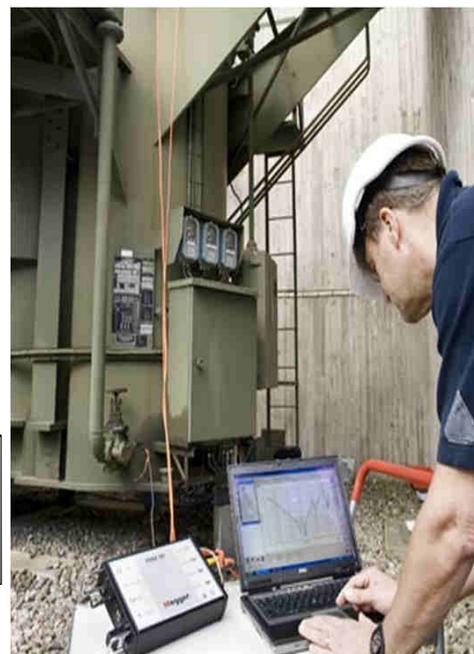


Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Frequenzganganalyse

- leistungsstarke Diagnosetechnik
- Erkennung der Veränderungen der Parameter im Frequenzbereich
- **verschiedene Messmethoden**
 - **Impulse Frequency Response Analysis (IFRA)**
 - Anregung mit einer Impulsspannung
 - Messung der Impulsantwort am Ausgang
 - Transformation in den Frequenzbereich
 - **Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)**
 - Anregung frequenzveränderliches Sinussignal zwischen 10 Hz und 1 MHz
 - Niederspannungssignal zwischen 10 V bis 12 V



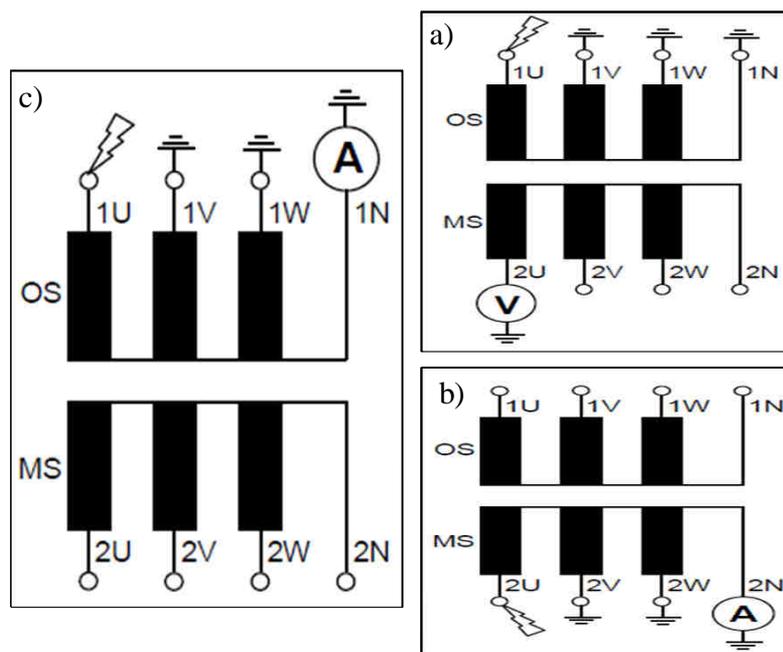
[6]

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Messtechnisches Verfahren

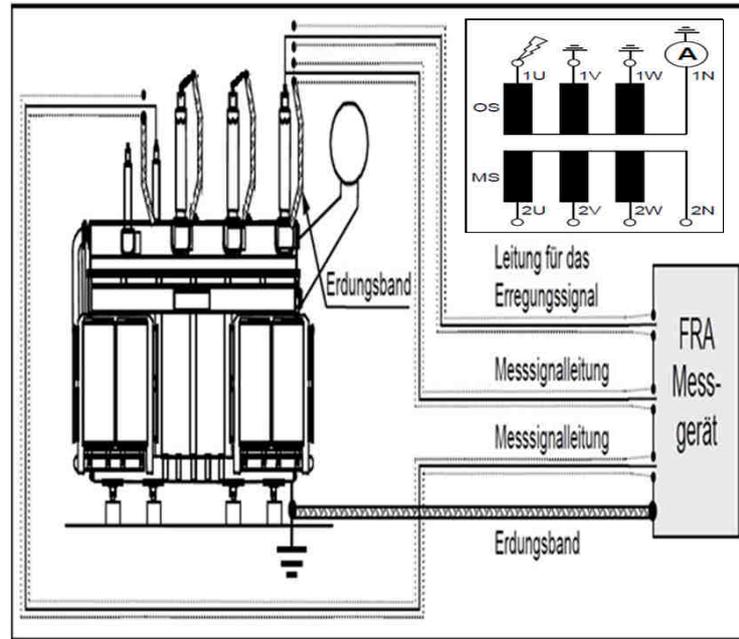
- Leistungstransformator vom Netz getrennt
- Anregung mit einer sinusförmigen Spannung
- Vergleich des Ausgangssignals mit der Referenzkurve



[7]

Messtechnisches Verfahren

- Ankopplung des Messsystems und des Anschlusses
- Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Die Verlegung der Erdung erfolgt unmittelbar entlang der Freiluftdurchführung
- Keine Verwendung von abgeschirmten Leitungen



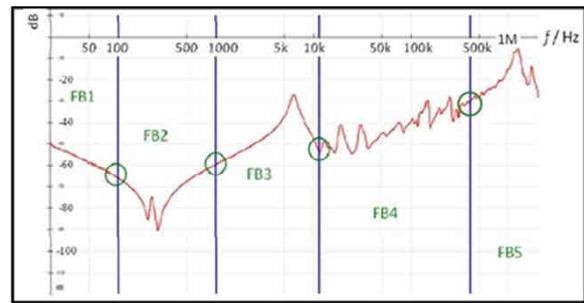
[7]

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnisches Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Fehleranalyse

- diagnostizieren der mechanische Verformung
- Auswirkungen der Parameter in verschiedenen Bereichen
- Dämpfungsunterschiede und die Verschiebungen von Resonanzen
- **Auswirkungen des Kerns**
 - Frequenzbereich unterhalb 10 kHz
- **Frequenzverhalten der Messkabel**
 - im Hörfrequenzbereich

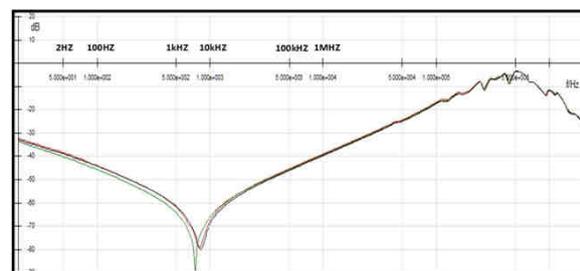


Frequenzbereich	Parameter
FB1	L_s
FB2	C_g
FB3	C_g
FB4	M_{ij}
FB5	M_{ij} und Zuleitung

[7]

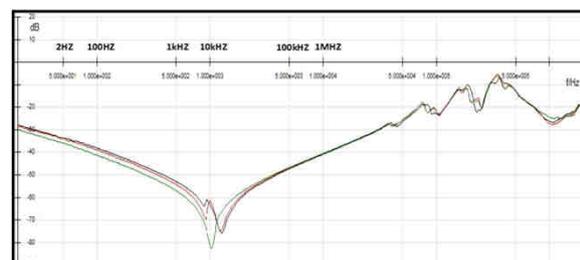
Fehleranalyse

- FRA-Messung an 11 / 0,433 kV, 1000VA Transformator
- keine signifikanten Änderungen in der FRA-Antwort
- Keine mechanischen Fehler



[6]

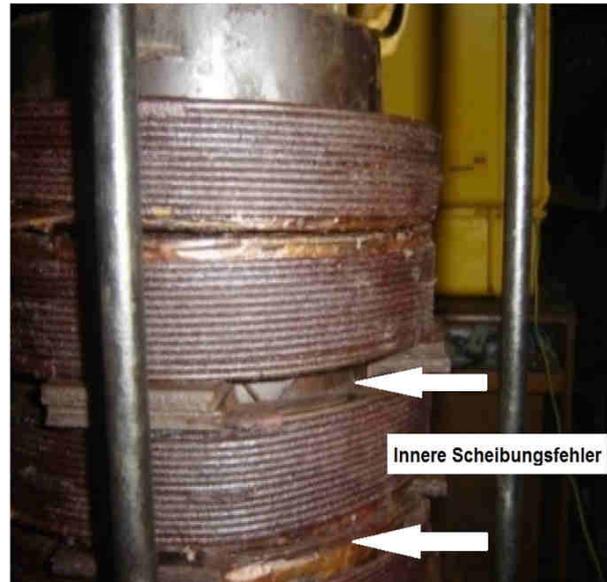
- **Abweichung im FRA-Muster**
 - Frequenz unter 50 kHz
 - Frequenz über 1 MHz
- Magnetisierung des Kerns
- Verformung am Wicklungsaufbau



[8]

Fehleranalyse

- **Ursache**
 - mechanischer Belastung
 - Kurzschlussfehler
- **Auswirkung**
 - den Abstand zwischen den fehlerhaften OS- und US-Wicklungen Windungen (Δh)
- **Veränderung des Parameters**
 - Parallele Kapazitäten (C_{sh})
 - Die gegenseitige Induktivität (M_{ij})
- **Auswirkung an FRA- Messung**
 - keinen signifikanten Effekt bei Frequenzen unter ca. 300 kHz



[9],[5]

Agenda

- Einleitung
- Reales Ersatzschaltbild von Leistungstransformatoren
- Frequenzganganalyse
- Messtechnische Verfahren
- Fehleranalyse
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Frequenzganganalyse (FRA) ist einer der wichtigsten Diagnosewerkzeuge
- Zustandsbewertung von inneren Bauelementen in Leistungstransformatoren
- Erkennung der mechanischen Verschiebungen und Verformungen im Transformator Kern und in der Transformatorwicklung
- Reproduzierbare Messergebnisse ausschließlich mit geschirmten Leitungen und einem guten Erdungskonzept
- zwei verschiedene Messverfahren:
 - direkt im Frequenzbereich (SFRA)
 - im Zeitbereich (IFRA)
- Fehler Erkennung nach dem Vergleich des Antwortsignals mit einer Referenzkurve

Fehlertyp	Frequenz Bereich		
	<20 kHz	20-400 kHz	>400 kHz
Axiale Verschiebung	kein Effekt	Resonanzfrequenzen und Größe verringert	Resonanzfrequenzen und Größe erhöht
Radiale Verschiebung	Steigerung der Resonanzfrequenzen	Resonanzfrequenzen erhöht	Steigerung der Resonanzfrequenzen Größe verringert sich, eine Resonanzfrequenz verschwindet
Durchführung	kein Effekt	kein Effekt	kein Effekt
Dielektrischer Leck Strom	Verringerung der Größe	Verringerung der Größe	Kein Effekt
Innere Scheibungsfehler	kein signifikanter Effekt	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht
Kurzschlussfehler	kein signifikanter Effekt	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht	Resonanzfrequenzen und Größenordnungen erhöht

Literatur

- [1] <https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/energie-und-effizienz/stromuebertragung-mobiler-plug-and-play-transformator.html>
- [2] https://www.123rf.com/stock-photo/electrical_engineering.html
- [3] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TMW_50971_Transformatorschenkel_eines_Leistungstransformators_mit_aufgeschnittenen_Wicklungen.jpg?uselang=de
- [4] Koopmann Energie- und Elektrotechnik Niederrhein GmbH PRÜF- UND DIAGNOSEVERFAHREN Inbetriebnahmeprüfungen und Zustandsanalysen für Übertragungs- und Verteilnetze
- [5] A. Abu-Siada, Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures, IEEE Paper, 2013.
- [6] <http://de.megger.com/produkt/transformatorpruefung/isolationsmessung-an-transformatoren>
- [7] René Martin Wimmer, Die Ermittlung der Übertragungsfunktion von Großtransformatoren mittels On- und Offline-Messungen, Vorlesungsskripte, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, 2010
- [8] Mohd Aizam Talib*, Nurul Atikah Saeidi, Wan Noraishah Wan Abdul Munim, Diagnosis of Winding Displacement in Power Transformer Using Frequency Response Analysis Technique, Langwaki, Malaysia, 2013
- [9] Suwarno and F. Donald, Frequency Response Analysis (FRA) for Diagnosis of Power Transformers, IEEE Paper, 2010.



Frequenzganganalyse von Leistungstransformatoren

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule in Schaltstrecken der Niederspannungstechnik

Properties and behavior of the residual arc gas column in low voltage arc gaps

Janine Gläßner

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – elenia, Braunschweig, j.glaessner@tu-bs.de

Kurzfassung

Um die Eigenschaften und das Verhalten der Bogenrestgassäule zu verstehen, sind die Grundlagen eines Lichtbogens wichtig. Zunächst wird die Motivation des Themas erklärt, anschließend wird das Auftreten und eine mathematische Beschreibung des Lichtbogens in Form eines Gleichungssystems erläutert. Mit diesen Hilfsmitteln ist auch die Beschreibung der Restgassäule verständlich. Zum Schluss werden in der Zusammenfassung alle Ergebnisse als Überblick dargestellt.

Abstract

The foundations of an arc are important to understand the properties and behavior of residual arc gas columns. At first the motivation is shown and the entrance of arcs is explained. Then a mathematical calculation in form of a system of equations is offered to the readers. With these tools the description of arc residual gas columns is understandable. At least there is an overview of all results.

1 Einleitung

Schaltgeräte dienen zum Schutz vor Kurzschlüssen oder Überschlägen. Kommt es zu einem Kurzschluss, unterbricht ein solcher Schalter diesen. Die Kontakte werden geöffnet. Die Öffnungsstrecke wird in Form eines Lichtbogens überbrückt. Nachdem der Lichtbogen erloschen ist, besteht die Gefahr eines Wiederezündens. [3] Die Gefahr des Wiederezündens steht im Zusammenhang mit der Bogenrestgassäule. Im Folgenden sollen die Eigenschaften und das Verhalten einer Bogenrestgassäule herausgefunden werden. [1, 4, 6, 7] Als erstes wird in dem Abschnitt theoretische Grundlagen der Lichtbogen erklärt und eine mögliche mathematische Beschreibung erläutert. Auch das „Prinzip der minimalen Brennspannung“ wird beschrieben. Im Abschnitt Eigenschaften und Verhalten wird zunächst der Magnetfeldeinfluss erklärt. Im Anschluss wird ein Versuch erläutert, an dem der Einfluss des Elektrodenabstandes erkennbar wird. Danach wird die Ionisation erklärt. Im folgenden Abschnitt wird die Werkstoff- und Frequenzabhängigkeit näher erläutert. Zum Schluss folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Theoretische Grundlagen

Schaltet man einen induktiven Stromkreis aus, kommt es zwischen den Kontakten zu einem Gasentladen, dem Lichtbogen. Unterschreiten Strom und Spannung bestimmte Grenzwerte, erlischt dieser. Um den Lichtbogen aufrecht zu erhalten, dürfen Strom und Spannung bestimmte Grenzwerte nicht unterschreiten. [2] Eine mathematische Beschreibung ist über ein Gleichungssystem aus 6 Gleichungen möglich.

Eine der Gleichungen gibt den Zusammenhang zwischen der Feldstärke und dem Potential wieder.

Eine mögliche mathematische Beschreibung eines Lichtbogens kann durch ein System von Differentialgleichungen erfolgen. Dabei wird angenommen, dass die Temperatur- und Dichtegradienten im Lichtbogen größer sind als die mittlere freie Weglänge der Teilchen, sodass gilt

$$\text{grad}(T, p) \gg \lambda_m$$

Die Temperatur und der Druck können somit als konstant betrachtet werden. [1, 9, 10] Die Geschwindigkeit der Teilchen folgt dabei der Maxwellverteilung und ist in Abbildung 1 dargestellt.

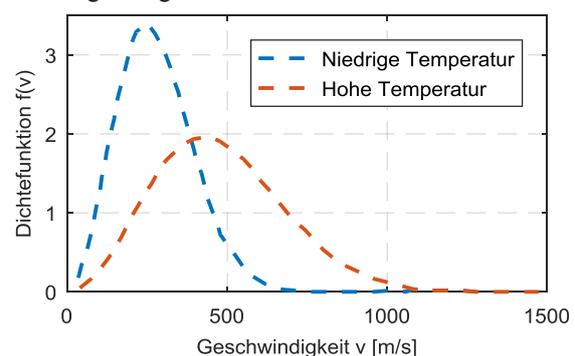


Abbildung 1: Maxwell Geschwindigkeitsverteilung

Die Besetzung der energetischen Niveaus kann durch die Boltzmann-Konstante charakterisiert werden und ist zur Veranschaulichung in Abbildung 2 zu sehen.

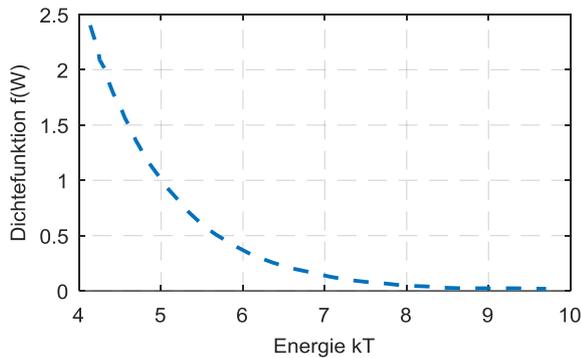


Abbildung 2: Besetzungswahrscheinlichkeit nach Boltzmann

Weiterhin kann die Ionisation im Lichtbogen durch die Saha-Gleichung beschrieben werden, welche durch

$$N_i N_e = const * p * T^2 e^{\frac{1}{kT} (-W_i)}$$

gegeben ist und sich aus den Ionisation – und Rekombinationsprozessen ableitet. [1, 9, 10]

Eine der Gleichungen gibt den Zusammenhang zwischen der Feldstärke E und dem Potential Φ wieder:

$$E = -grad\Phi \quad (1)$$

Auch die Kontinuitätsgleichung wird im Gleichungssystem berücksichtigt:

$$div(J_i + J_e) = 0 \quad (2)$$

Hierbei ist J_e Elektronenstromdichte und J_i die Ionenstromdichte. Die Elektronenstromdichte wird durch die folgende Gleichung:

$$J_e = eN b_e E + e D_e grad N \quad (3)$$

beschrieben. In dieser ist e die Elementarladung, b_e die Elektronenbeweglichkeit, N die Anzahl der Elektronen je Volumeneinheit und D_e der Diffusionskoeffizient der Elektronen. Zudem muss auch Ionenstromdichte beachtet werden:

$$J_i = eN b_i E - e D_i grad N \quad (4)$$

Die Parameter sind hier ähnlich der in Gleichung (3). Die Variablen N, D und b beziehen sich jedoch auf die Ionen. In den Gleichungen (3) und (4) ist auf der rechten Seite der ohmsche Anteil (erster Ausdruck) und der Anteil der Diffusion an der Stromdichte (zweiter Anteil) dargestellt.

Eine weitere Gleichung des Systems stellt die Leistungsbilanz dar:

$$(J_e + J_i)E = eU_i \frac{(\partial N)}{(\partial T)} + S - div U_i J_e - div \lambda grad T + c \frac{(\partial T)}{(\partial t)} \quad (5)$$

U_i betitelt die Ionisierungsspannung. Das Glied auf der linken Seite der Gleichung (5) ist die durch Stromfluss zugeführte Leistung. Auf der rechten Seite stellt das erste Glied die Leistung zur Neubildung von Ladungsträgern dar. Darauf folgen in derselben Reihenfolge wie die obigen Glieder der Leistungsverlust durch Strahlung, abfließende Ladungsträger und Wärmeleistung. Das letzte Glied gibt die Leistung zur Erwärmung des Plasmas an. Die letzte Gleichung gibt den Zusammenhang zwischen Ladungsträgerdichte und Temperatur wieder:

$$N = a \exp\left(\frac{-eU_i}{2kT}\right) \quad (6)$$

Die Konstante a. ist ein Ausdruck, der den Druck p, die Boltzmann-Konstante k, das Planck'sche Wirkungsquantum h und die Elektronenmasse m_e beinhaltet.

Zum Lösen des Gleichungssystems sind Vereinfachungen erforderlich. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass es sich um stationäre Verhältnisse handelt. Des Weiteren wird angenommen, dass es keine Raumladung, keine Störung durch die Elektroden und kein Magnetfeld gibt. Auch der Konvektionsstrom wird vernachlässigt. Mit diesen Annahmen kann das Gleichungssystem gelöst werden. Die Gleichung (5) vereinfacht.

Mit bekannten Koeffizienten und geeigneten Randbedingungen können grundlegende physikalische Zusammenhänge des Lichtbogens verstanden und berücksichtigt werden

Nach dem „Prinzip der minimalen Brennspannung“ stellen sich Achsentemperatur und Radius des Leitfähigkeitsgebietes einer Bogensäule so ein, dass die Brennspannung einen Minimalwert annimmt. Die Stromstärke wird als gegeben und die Randbedingungen als festgehalten angenommen. Die Leistungsbilanz ist eine eulersche Form des allgemeinen Minimalprinzips. Ein Teil der Leistungsbilanz ist die Wärmeleistung. [1, 7] Eine wichtige Eigenschaft ist die, den Elektroden zugeführte, Wärmeleistung. Diese ist in vielen Bereichen von technischer Bedeutung. In Schaltern zum Beispiel muss diese Leistung abgeführt werden. Die Wärmeleistung wird proportional zur Stromstärke erwartet. Für Bogenlängen unter 1cm ist die Leistung stark längenabhängig. Mit zunehmender Bogenlänge steigt die Wärmeleistung erst rasch an und steigt dann langsam weiter an. Dies gilt für stationäre Lichtbögen. [1] Bei dynamischen Lichtbögen müssen zusätzlich Trägheitseffekte beachtet werden, welche für die dynamische Bogenkennlinie verantwortlich sind. Die Temperaturverteilung und der Leitwert des Bogens, welcher von der Gasart, vom Druck und von der Temperatur abhängt, passen sich nur verzögert den Gleichgewichtswerten an. Die Verzögerung liegt an der Wärmekapazität des Plasmas. Es kann bei sehr schnellen Änderungen zu Unterschieden zwischen der Elektronen- und Gastemperatur kommen. Die Trägheit des Leitwertes bewirkt eine Restleitfähigkeit im Stromnulldurchgang. [4]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Kommt nach Erlöschen des Bogens die Spannung wieder und übersteigt dessen Wärmeleistung die abgeführte Wärme, kommt es zur thermischen Wiederezündung. [4]

Tritt keine thermische Wiederezündung ein, kann ein Schalter jedoch später, während die Spannung weiter ansteigt, noch durch einen Durchschlag dielektrisch wieder gezündet werden. [4,5]

Um die Eigenschaften und das Verhalten der Bogenrestgassäule zu verstehen werden zunächst verschiedene Möglichkeiten zur Verhinderung einer Wiederezündung erläutert. Zwei elementare Eigenschaften der Bogenrestgassäule sind die Temperatur und dielektrische Eigenschaften.

3.1 Magnetfeldeinfluss

Um das Wiederezünden beeinflussen zu können wird mit Hilfe isoliert angeordneter Stahlbleche der Lichtbogen in eine Löschkammer geführt. Diese Anordnung zeigt **Abbildung 3**.

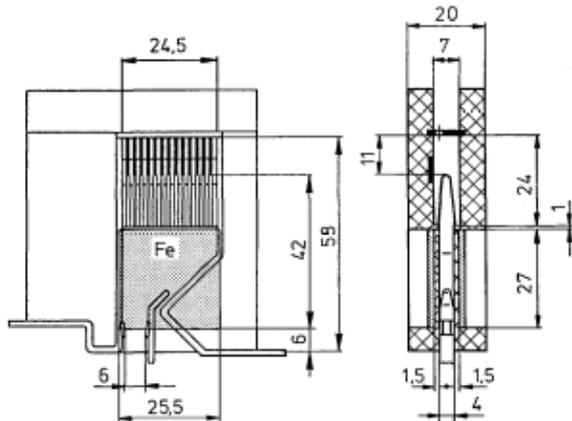


Abbildung 3: Aufbau zur Untersuchung des Magnetfeldeinflusses [6]

Beidseitig vom Lichtbogenraum befinden sich Eisenbleche, die durch dickes Muratherm-Material dielektrisch getrennt sind. In dem Bereich, wo der Bogen entstehen wird, beginnen diese auf der Mitte der Kontaktstücke. Unterhalb der Löschblechschalen, jedoch ohne Berührung, befinden sich sogenannte Blas- oder Saugbleche. Dadurch entsteht eine verstärkte Saugkraft.

Wird nun das Eigenmagnetfeld durch Ferromagnetika verstärkt, hat es Einfluss auf die Durchschlagsentwicklung. Es werden (Restplasma-) Ströme generiert. Durch wesentlich erhöhte Blasfeldinduktion werden diese Ströme in dem vom Bogen durchwanderten Gebiet stärker „abgesaugt“ [6]. Außerdem wird die mittlere freie Weglänge der Teilchen verkürzt. Dadurch wird die Trägerbeweglichkeit und die Leitfähigkeit des Gases reduziert. Durch paarweise angeordnete Bleche kommt es zu einer unsymmetrischen Magnetfeldverteilung.

Somit kann gezeigt werden, dass sowohl das Magnetfeld als auch dessen Verteilung das Verhalten der

Bogenrestgassäule beeinflussen. Hierdurch wurden weitere Eigenschaften einer Bogenrestgassäule identifiziert. [6]

3.2 Elektrodenabstand

Wie schon in der Einleitung erläutert ist eine weitere Eigenschaft die Temperatur. Da die Abkühlung von der Elektrode ausgeht, die kalt ist, kann man versuchen mit Hilfe des Elektrodenabstandes das Wiederezünden zu verhindern. Dazu wird in einem Versuch der zeitliche Anstieg der dielektrischen Festigkeit der Restsäule untersucht. Unter den sonst jeweils gleichen Bedingungen wird von Versuch zu Versuch die Spannungssteigerung langsamer durchgeführt. Es entsteht der in **Abbildung 4** dargestellte Verlauf.

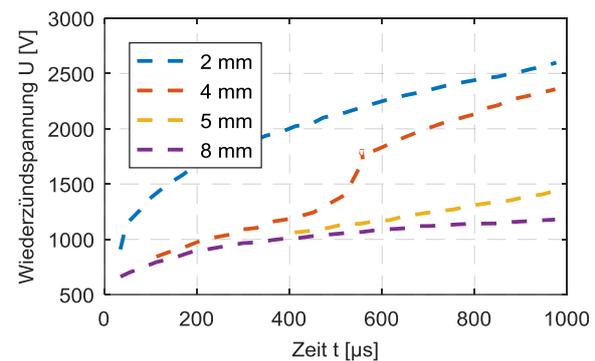


Abbildung 4: Wiederezündung in Abhängigkeit zum Elektrodenabstand

Je kleiner der Abstand der Elektroden, desto wirksamer ist die Abkühlung. Die kritische Temperatur befindet sich in der Mitte. Je weiter die Elektroden voneinander entfernt sind, desto später wird die kritische Temperatur überschritten. [7, 1]

Unter Quelle [1] konnte identifiziert werden, dass der Elektrodenabstand, die Oberflächenschicht und auch das Elektrodenmaterial Einfluss auf die Bogenrestgassäule haben. [1]

3.3 Ionisierung

Eine geringe Gasdichte begünstigt einen elektrischen Durchschlag. Aufgrund eines Anstiegs der Feldstärke kann es in einem ursprünglich kaum oder nicht ionisierten Raum zu neuen Ladungsträgern durch Stoßionisation kommen. Reichen diese aus, kommt es zu einem Durchschlag. Der Lichtbogen wird wiedergezündet. Es kann auch auf Grund der Temperatur eine Restionisation der Entladungsstrecke entstehen. Die Elektronen bewegen sich im Feld der wieder gekehrten Spannung in Richtung der Anode. Fehlt der Kathode die nötige Elektronenemission, bildet sich eine positive Raumladungsschicht an der Kathode. Wird diese Schicht durchschlagen, entsteht ein Lichtbogen. [1,6]

Es ist somit erkennbar, dass die Ionisation und die Beschaffenheit der Kathode ebenfalls eine bedeutende Eigenschaft der Bogenrestgassäule ist, die das Wiederezünden beeinflusst. [1, 7]

3.4 Frequenz- und Werkstoffabhängigkeit

In einem Versuch mit Kontaktwerkstoffen aus Silber und Kupfer und Verbundwerkstoffen aus Silber-Cadmiumoxid (90/10), Silber-Nickel (80/20) und Wolfram-Silber (70/30) soll die Frequenzabhängigkeit untersucht werden. Die Spannung beträgt 220 V, die Stromstärke 100 A und der Leistungsfaktor beträgt 0,4. Die Schaltstücke werden mit 0,6m/s getrennt. Die Frequenz wird zunächst zu 167 kHz eingestellt. Während des Versuchs wird die Frequenz schrittweise gesenkt, bis zur Löschung des Lichtbogens. Das Ergebnis zeigt die **Abbildung 5**.

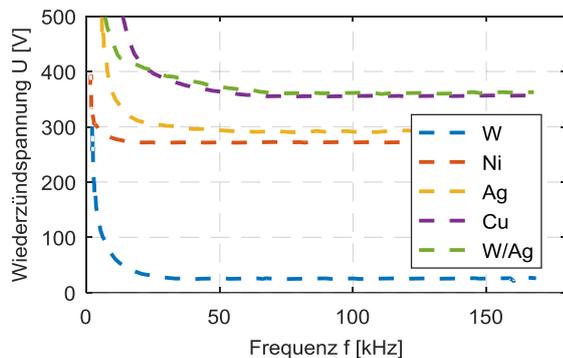


Abbildung 5: Löscherung in Abhängigkeit der Frequenz

Die Wiederverfestigung nimmt zunächst mit steigender Eigenfrequenz rasch ab. Dann bleibt diese in einem weiten Bereich bis zur höchsten Frequenz konstant. Dort tritt sogenannte Sofortverfestigung auf. Die Werkstoffe haben somit Einfluss auf die Wiederverfestigung. Im Bereich der Nicht-Sofortverfestigung ist auch die Frequenz zu beachten. Daraus kann festgehalten werden, dass auch die Frequenz und der Werkstoff zu den Eigenschaften der Restgassäule zählen. [8]

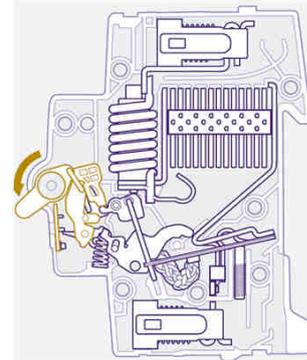
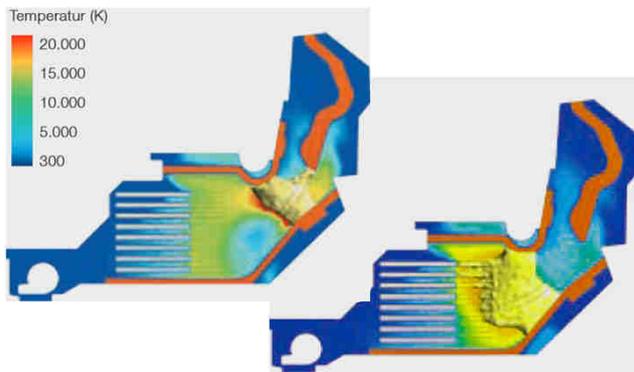
4 Zusammenfassung/Fazit

Wird ein induktiver Stromkreis ausgeschaltet, kommt es zu einem Lichtbogen. Nach Erlöschen des Lichtbogens besteht die Gefahr einer Wiederverzündung. Die Bogenrestgassäule wurde unter diesen Gesichtspunkten untersucht. Ein Lichtbogen kann durch ein Gleichungssystem beschrieben werden. An Hand des „Prinzips der minimalen Brennspannung“ kann

festgestellt werden, dass die Wärmeleistung von Bedeutung ist. Diese taucht auch in der Leistungsbilanz auf. Sie stellt eine Gleichung des Gleichungssystems dar. Da es zu einer thermischen Wiederverzündung kommen kann, ist auch die Temperatur eine wichtige Eigenschaft der Restgassäule. Eine Abkühlung verringert das Risiko. Der Abkühlprozess geht von den Elektroden aus. So hat auch der Elektrodenabstand eine wesentliche Bedeutung. Auch die Oberflächenschicht und das Material der Elektrode haben Einfluss auf das Wiederverzünden und somit auch auf die Restgassäule. Aber auch die Frequenz ist von Bedeutung.

5 Literatur

- [1] W. Rieder, Plasma und Lichtbogen, Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1967
- [2] W. Bieneck, Elektro T Grundlagen der Elektrotechnik, Stuttgart: Holland+Josenhans Verlag, 7. durchgesehene Auflage, 2010
- [3] G. Lesch, herausgegeben von E. Baumann, Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag, 1959
- [4] M. Lindmayer, Schaltgeräte Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise, Heidelberg: Springer Verlag, 1987
- [5] G. Hosemann, Elektrische Energietechnik Band 3: Netze, Berlin/Heidelberg: 1988
- [6] G. Schipper, Untersuchung des Lichtbogenverhaltens in kompakten strombegrenzten Löscherblechkammern, Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1994
- [7] A. Erk, M. Schmelzle, Grundlagen der Schaltgerätetechnik, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1974
- [8] M. Schmelzle, Grenzen der Selbstauslöschung kurzer Lichtbogenstrecken bei Wechselstrombelastung, Braunschweig, 1968
- [9] U. Stroth, Plasmaphysik, Phänomene, Grundlagen, Anwendungen, 2011
- [10] Raizer, Gas Discharge Physics, 1991



Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule in Schaltstrecken der Niederspannungstechnik

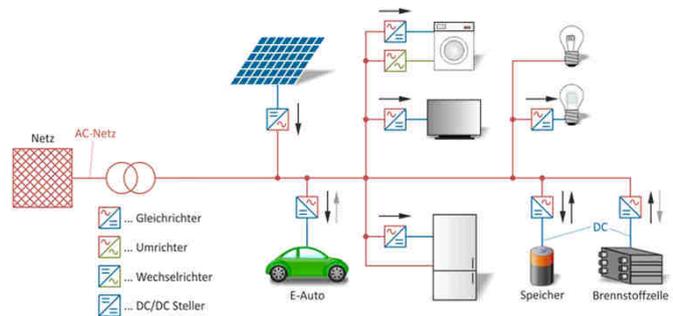
Janine Gläßner, 05.07.2017

Agenda

- **Einleitung**
- **Theoretische Grundlagen**
- **Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule**
 - Temperatur und dielektrische Eigenschaften
 - Magnetfeldeinfluss
 - Elektrodenabstand
 - Ionisierung
 - Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit
- **Zusammenfassung**
- **Quellen**

Einleitung

- Schaltgeräte als Schutz vor Kurzschlüssen oder Überschlügen
- Verhinderung durch Lichtbogen
- Nach Auslöschung Gefahr des Wiederzündens
- Gefahr des Wiederzündens in Zusammenhang mit Restgassäule
- Von Bedeutung: Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule



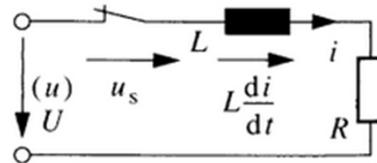
Agenda

- **Einleitung**
- **Theoretische Grundlagen**
- **Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule**
 - Temperatur und dielektrische Eigenschaften
 - Magnetfeldeinfluss
 - Elektrodenabstand
 - Ionisierung
 - Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit
- **Zusammenfassung**

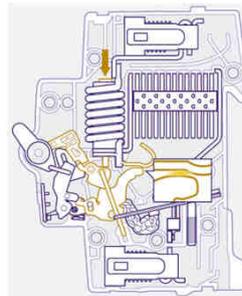
Theoretische Grundlagen

Einstieg: Elektrischer Lichtbogen

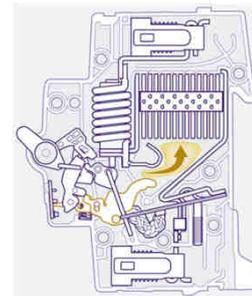
- Ausschalten eines induktiven Stromkreises
 - Gasentladung zwischen Kontakten
 - Bei hohem Stromfluss Lichtbogen
- Aufrechterhalten des Lichtbogens
 - Strom und Spannung: Bedingungen/Grenzwerte die zu erfüllen sind
- Mathematische Beschreibung
 - System von Differentialgleichungen



Quelle: Erk, Schmelzle
ESB R-L Kreis



Quelle: CRC ABB
Kontakttrennung-Lichtbogen



Quelle: CRC ABB
Lichtbogen sichtbar

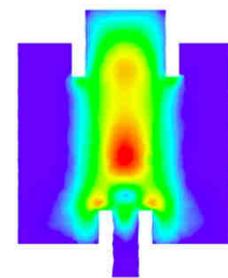
Theoretische Grundlagen

Differentialgleichungssystem

- (1) $E = -grad(\varphi)$
- (2) $div(J_i + J_e) = 0$
- (3) $J_i = e \cdot N \cdot b_i \cdot E - e \cdot D_i \cdot grad(N)$
- (4) $J_e = e \cdot N \cdot b_e \cdot E + e \cdot D_e \cdot grad(N)$
 $(J_i + J_e) \cdot E =$
- (5) $e \cdot U_i \cdot \frac{\partial N}{\partial T} + S - div(U_i \cdot J_e) - div\lambda grad(T) + c \frac{\partial T}{\partial t}$

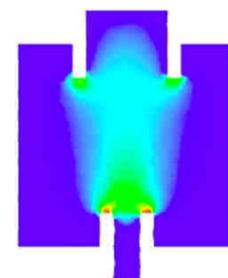
Hiermit identifizierte Eigenschaften

- Ein Teil der Leistungsbilanz ist die Wärmeleistung
- Proportional zur Stromstärke
- Mit zunehmender Bogenlänge steigt Wärmeleistung erst rasch, später langsam an



x-y Plot v-Verteilung

Quelle: ETH Zürich



x-y Plot T-Verteilung

Quelle: ETH Zürich

Theoretische Grundlagen

Vereinfachungen und Annahmen

(1) Längenskalen sind: $grad(T, p) \gg \lambda_m$

(2) Geschwindigkeit der Teilchen folgt der Maxwellverteilung

$$f(v) \sim e^{-\frac{m \cdot v}{k \cdot T}}$$

(3) Besetzung der Energieniveaus folgt der Boltzmannverteilung

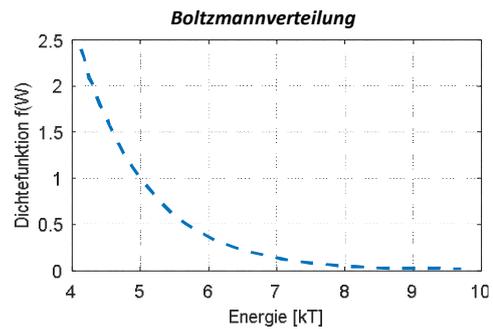
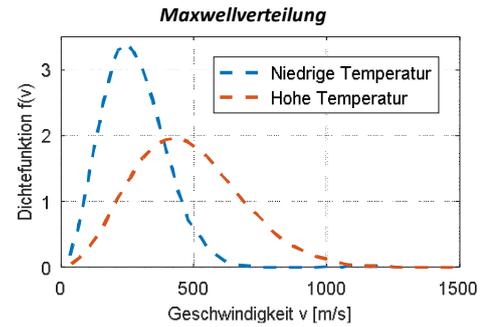
$$f(W) \sim e^{-\frac{W}{k \cdot T}}$$

(4) Ionisation im Lichtbogen wird durch Saha-Gleichung beschrieben

$$N = \alpha \cdot \exp\left(\frac{-eU_i}{2kT}\right)$$

(5) Steenbeck'sches Minimalprinzip

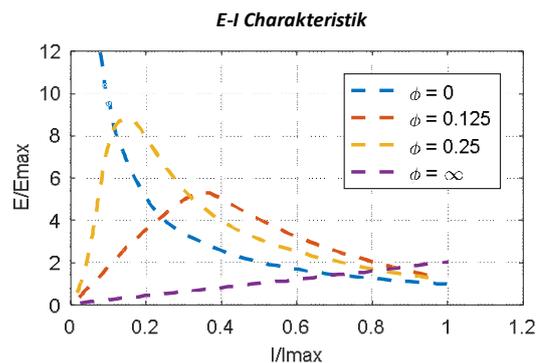
$$\frac{dE}{dr} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{dE}{dT} = 0$$



Theoretische Grundlagen

Ergänzungen Dynamischer Lichtbogen

- Bei dynamischen Bögen zusätzlich Trägheitseffekte
- Temperaturverteilung und Leitwert
 - Verzögerte Anpassung an den Gleichgewichtswerten
- Verzögerung durch Wärmekapazität des Plasmas
- Restleitfähigkeit im Stromnulldurchgang



Quelle: W. Rieder, Plasma und Lichtbogen

Agenda

- **Einleitung**
- **Theoretische Grundlagen**
- **Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule**
 - Temperatur und dielektrische Eigenschaften
 - Magnetfeldeinfluss
 - Elektrodenabstand
 - Ionisierung
 - Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit
- **Zusammenfassung**

Eigenschaften und Verhalten Thermisch und Dielektrisch

Temperatur

- Thermische Wiederzündung
 - Kommt nach Erlöschen Spannung wieder
 - Wärmeleistung >> abgeführte Wärme

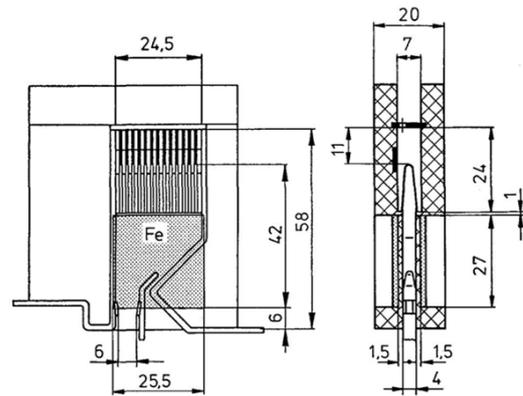
Dielektrisch

- Dielektrisches Wiederzündung
 - Anstieg der Spannung -> Durchschlag
 - Wiederzünden

Eigenschaften und Verhalten Magnetfeldeinfluss

Experimentelle Untersuchungen

- Messaufbau:
 - Mit Stahlblechen Lichtbogen in Löschkammer geführt
 - Beidseitig vom Lichtbogenraum Eisenbleche (elektrisch getrennt)
 - Bleche beginnen dort, in der Mitte des Entstehungsortes des Lichtbogens
 - Unterhalb der Löschblechschenke befinden sich Blas- und Saugbleche

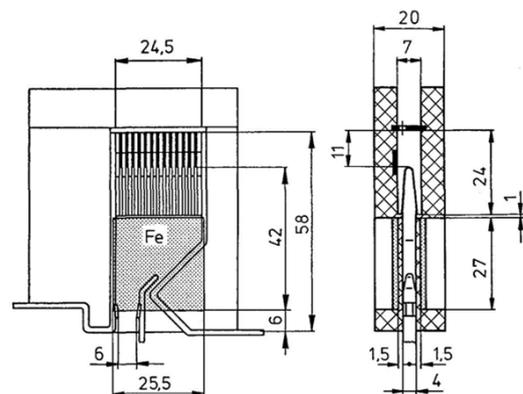


Experimentelle Anordnung
Quelle: Diss. Schipper, TU BS

Eigenschaften und Verhalten Magnetfeldeinfluss

Experimentelle Untersuchungen

- Beobachtungen:
 - Wird in der Anordnung Eigenmagnetfeld verstärkt, wird die Durchschlagentwicklung beeinflusst
 - Paarweise angeordnete Bleche erzeugen unsymmetrisches Magnetfeld
 - Trägerbeweglichkeit und Leitfähigkeit werden beeinflusst

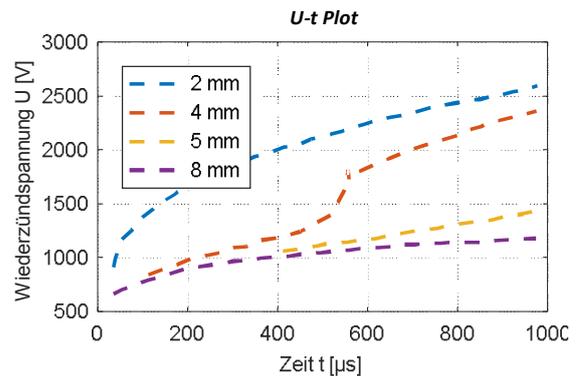


Experimentelle Anordnung
Quelle: Diss. Schipper, TU BS

Eigenschaften und Verhalten Elektrodenabstand

Experimentelle Untersuchung

- Messparameter:
 - Abkühlung von Elektrode ausgehend
 - Versuch zum zeitlichen Anstieg der dielektrischen Festigkeit der Bogenrestgassäule
 - Abgesehen von Spannungsanstieg gleiche Bedingungen
 - Bei jedem Durchgang Spannungssteigerung langsamer

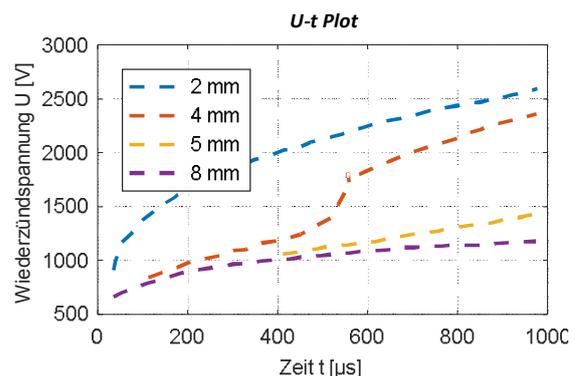


Quelle: W. Rieder, Plasma und Lichtbogen

Eigenschaften und Verhalten Elektrodenabstand

Experimentelle Untersuchung

- Messergebnisse:
 - Je kleiner Elektrodenabstand, desto wirksamer Abkühlung
 - Kritische Temperatur in Mitte
 - Je weiter Elektroden von einander entfernt, desto später kritische Temperatur erreicht



Quelle: W. Rieder, Plasma und Lichtbogen

Eigenschaften und Verhalten Ionisierung

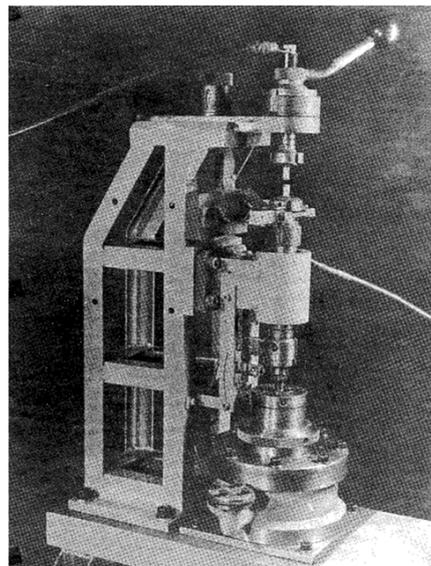
Experimentelle Untersuchungen

- Geringe Gasdichte begünstigt elektrischen Durchschlag
- Anstieg Feldstärke → ausreichend Stoßionisation → neue Ladungsträger
- Genug neue Ladungsträger → Durchschlag
- Wiedertzündung
- Aufgrund der Temperatur kann es eine Restionisation geben
- Elektrodenbewegung zur Anode
- Bildung von Raumladungsschicht an Kathode
- Schicht durchschlagen → Lichtbogen
- → Ionisation Einfluss auf Restgassäule

Eigenschaften und Verhalten Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit

Experimentelle Untersuchung

- Messaufbau:
 - Kontaktwerkstoffen: Silber und Kupfer
 - Verbundwerkstoffen:
 - Silber-Cadmiumoxid (90/10),
 - Silber-Nickel (80/20)
 - Wolfram-Silber (70/30)
- Messablauf:
 - Konstante Spannung
 - Konstanter Strom
 - Frequenz schrittweise gesenkt
 - Bis Löschung

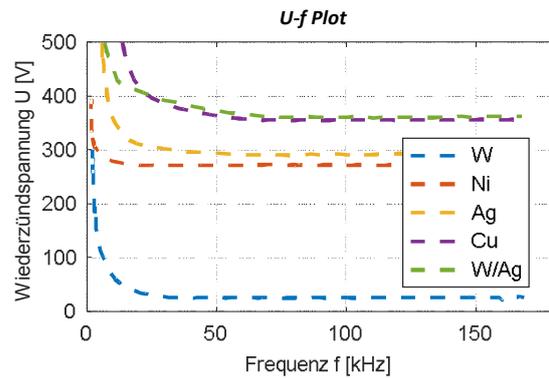


Experimentelle Anordnung
Quelle: Diss. Schmelzle, TU BS

Eigenschaften und Verhalten Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit

Experimentelle Untersuchung

- **Messauswertung:**
 - Wiederzündspannung nimmt zunächst mit steigender Eigenfrequenz rasch ab.
 - Dann in einem weiten Bereich bis Höchsthäufigkeit konstant.
 - Dort tritt sogenannte Sofortverfestigung auf
 - Werkstoff Einfluss auf Verfestigung
 - Im Bereich der Nicht-Sofortverfestigung durch Frequenz beeinflusst
 - **Frequenz und Werkstoff Einfluss auf Restgassäule**



Quelle: Diss. Schmelzle, TU BS

Agenda

- **Einleitung**
- **Theoretische Grundlagen**
- **Eigenschaften und Verhalten der Bogenrestgassäule**
 - Temperatur und dielektrische Eigenschaften
 - Magnetfeldeinfluss
 - Elektrodenabstand
 - Ionisierung
 - Elektrodenmaterial- und Frequenzabhängigkeit
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

Identifizierte Eigenschaften der Bogenrestgassäule

- Wärmeleistung
- Thermisch und dielektrische Eigenschaften

Identifizierte Einflussfaktoren der Bogenrestgassäule

- Elektrodenabstand + Abkühlprozess
- Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden
- Elektrodenmaterial
- Frequenz

➔ **Anhand dieser Eigenschaften konnten wir unser Wissen über die Bogenrestgassäule steigern**



05.07.2017 | Janine Gläßner | Bogenrestgassäule in Schaltstrecken | Seite 19



Quellen

- [1] W. Rieder, Plasma und Lichtbogen, 1967
- [2] W. Bieneck, Elektro T, Grundlagen der Elektrotechnik, 2010
- [3] G. Lesch, Lehrbuch der Hochspannungstechnik, 1959
- [4] M. Lindmayer, Schaltgeräte Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise, 1987
- [5] G. Hosemann, Elektrische Energietechnik Band 3, 1988
- [6] G. Schipper, Untersuchung des Lichtbogenverhaltens in kompakten strombegrenzten Löschblechkammern, 1994
- [7] A. Erk, M. Schmelzle, Grundlagen der Schaltgerätetechnik, 1974
- [8] M. Schmelzle, Grenzen der Selbstausschöpfung kurzer Lichtbogenstrecken bei Wechselstrombelastung, 1968
- [9] U. Stroth, Plasmaphysik, 2011
- [10] Y. Raizer, Gas Discharge Physics, 1968



05.07.2017 | Janine Gläßner | Bogenrestgassäule in Schaltstrecken | Seite 20



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Noch Fragen?



Technische
Universität
Braunschweig

05.07.2017 | Janine Gläßner | Bogenrestgassäule in Schaltstrecken | Seite 21

