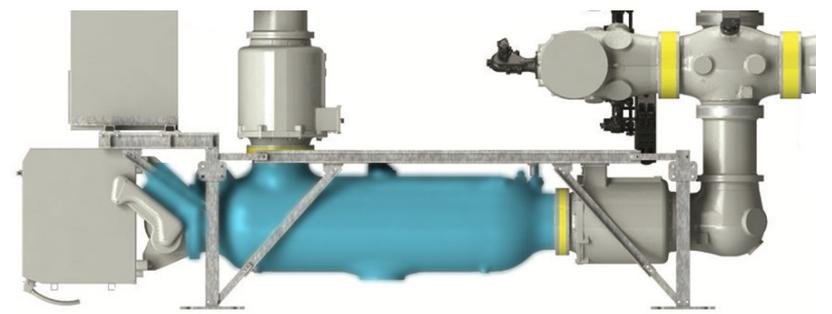
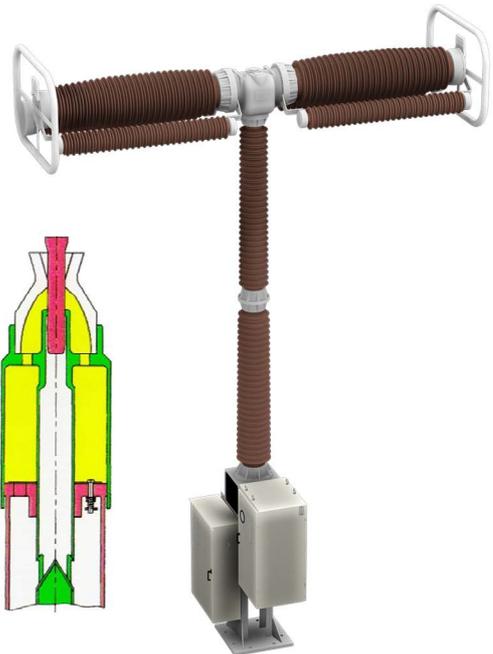
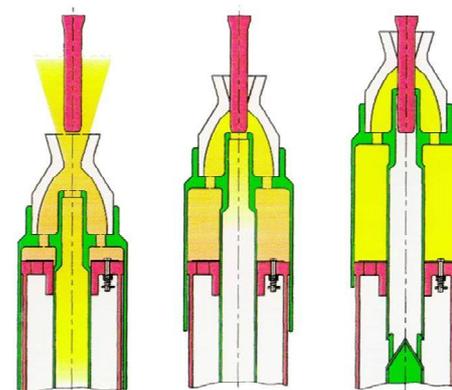
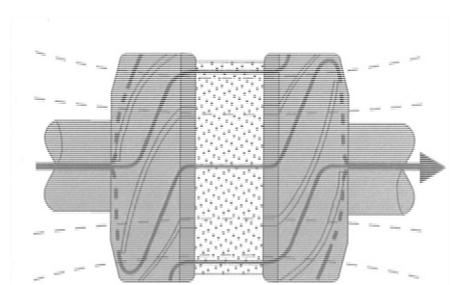
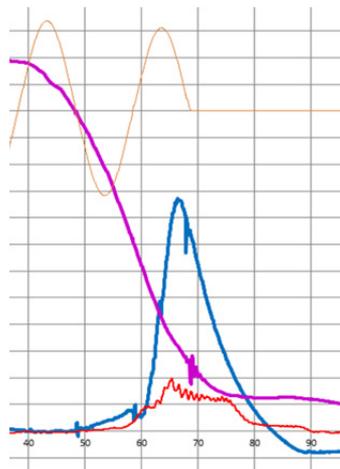


FKH - Fachtagung

24. November 2015
Hochschule für Technik, Rapperswil

Hochspannungs-Leistungsschalter



*FKH - Fachtagung
24. November 2015
Hochschule für Technik,
Rapperswil*

Hochspannungs-Leistungsschalter

Veranstalter:

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastrasse 9
8044 Zürich*

**FKH - Fachtagung
24. November 2015
Hochschule für Technik,
Rapperswil**

Vorwort zur Tagung

Die Fachveranstaltung „Hochspannungs-Leistungsschalter“ soll einem breiteren Fachpublikum einen Einblick in einige aktuelle Themen der Hochspannungs-Leistungsschalter bieten.

In diesem Band wurden die von den Autoren im Vorfeld abgegebenen Aufsätze, bzw. Kurzfassungen und Präsentationen zusammengestellt. Sie sollen den Teilnehmern als bleibende Gedankenstütze zum Inhalt dieser Tagung dienen.

Hochspannungsleistungsschalter stellen in den Energieversorgungsnetzen eine ausgesprochene Schlüsselkomponente dar. Mit ihnen werden nicht nur die Energieflüsse beherrscht, sondern sie sind auch die entscheidenden Komponenten zur Bewahrung der Netzinfrastruktur, sowie der Erzeuger- und Verbraucheranlagen vor Schäden bei Kurzschlüssen und anderen Betriebsstörungen. Zur Unterbrechung der extremen Kurzschlussströme werden an die Leistungsschalter höchste Anforderung an Zuverlässigkeit und Schnelligkeit gestellt. Dabei wird das Einhalten der Spezifikationen auch bei rasch wiederholten Fehlerausschaltungen vorausgesetzt.

Zur Erreichung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit wird von den Herstellern von Hochspannungsschaltern eine beachtliche Entwicklungsarbeit geleistet. Auch in den letzten Jahren haben diese Anstrengungen wieder zu wesentlichen Technologiefortschritten geführt.

Im Rahmen der FKH-Fachtagung am 24. November werden von den Entwicklungsingenieuren der Industrie wichtige Neuerungen im Schalterbau vorgestellt. Von den Netzbetreibern wird über die Anforderungen an Leistungsschaltern im Netz und die gemachten Betriebserfahrungen berichtet. Schliesslich wird auch auf die Fragen eingegangen, wie die hohen Anforderungen erreicht und überprüft werden und wie sie durch Instandhaltungsmassnahmen während einer möglichst langen Lebensdauer erhalten werden können.

Christian Lindner
Tagungsleiter

Dr. Reinhold Bräunlich
Geschäftsleiter der FKH

Tagungsprogramm

Datum: Dienstag, 24. November 2015
 Ort: Hochschule für Technik Rapperswil, Aula
 Titel: **Hochspannungs-Leistungsschalter**
 Tagungsleiter: Christian Lindner, Axpo Power AG

	Beitrag	Referent
09 ¹⁵ -09 ⁵⁰	Begrüssung Einführung, Entwicklung von Hochspannungsschaltern	Christian Lindner, Axpo Power AG, Baden
09 ⁵⁵ -10 ²⁵	Leistungsschalter in Kraftwerksanlagen: Konzepte und Betriebserfahrungen	Dr. Thomas Aschwanden, AF Engineers + Consultants (AFEC) GmbH, Iseltwald
10 ³⁰ -11 ⁰⁰	Vakuumschaltröhren bei höheren Spannungen (72 kV / 145 kV)	Dr. Jörg Teichmann, Siemens AG, Berlin
	Kaffeepause	
11 ³⁵ -12 ⁰⁵	420/550kV Single-Break, GIS-Schaltkammerdesign	Robert Lüscher, ALSTOM Grid GmbH, Oberentfelden
12 ¹⁰ -12 ⁴⁰	SF ₆ -freie Hochspannungs-Leistungsschalter	Dr. Walter Holaus, ABB Schweiz AG, Zürich
12 ⁴⁵ -13 ¹⁵	Gesteuertes Schalten und Monitoring	Dr. Michael Stanek, ABB Schweiz AG, Zürich
	Mittagessen	
14 ⁵⁰ -15 ²⁰	Zusammenspiel von Point-on-wave Steuerung mit Low-scattering Federspeicherantrieben für phasen- synchrones Schalten	Dr. Michael Walter, ALSTOM Grid GmbH, Oberentfelden
15 ²⁵ -15 ⁵⁵	Typprüfungen für Hochspannungs-Leistungsschalter	Dr. Radu-Marian Cernat, Siemens AG, Berlin
16 ⁰⁰ -16 ¹⁵	Schlussdiskussion	Christian Lindner
ab 16 ¹⁵	Ausklang, Apéro	

Ende der Veranstaltung ca. 17¹⁵

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Entwicklung von SF6- Hochspannungsleistungsschaltern Christian Lindner, Axpo Baden	1
Leistungsschalter in Kraftwerksanlagen: Konzepte und Betriebserfahrungen Dr. Thomas Aschwanden, AF Engineers + Consultants (AFEC) GmbH, Iseltwald	7
Vakuumschaltröhren bei höheren Spannungen Jörg Teichmann, Siemens AG, Berlin	19
420 / 550kV GIS Leistungsschalter Robert Lüscher, Alstom Grid GmbH, Oberentfelden	27
SF6-freie Hochspannungsleistungsschalter Dr. Walter Holaus, ABB Schweiz AG., Zürich	45
Gesteuertes Schalten und Monitoring von Leistungsschaltern Dr. Michael Stanek, ABB Schweiz AG, Zürich	53
Zusammenspiel von Point-on-Wave Steuerung mit Low-Scattering Federspeicherantrieben für phasensynchrones Schalten Dr. Michael. M. Walter, ALSTOM Grid GmbH, Oberentfelden	69
Typprüfungen für Hochspannungs-Leistungsschalter Dr. Radu-Marian Cernat, Siemens AG, Berlin	93
Referentenadressen	107
Internetseite zur Fachtagung	109
Notizen	111

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Entwicklung von SF6- Hochspannungsleistungsschaltern

Dipl.-Ing. Christian Lindner
Axpo Power AG, Baden

Funktion und beruflicher Werdegang

Start als Projektleiter für einen 220-kV-GIS-Schalter bei ABB in Baden, nach Kurzaufenthalt für ABB in Montreal; Übernahme der Schalterentwicklung für Freiluftschalter in Oerlikon. Wechsel in die ABB Management AG als Verantwortlicher für globales R&D und Marketing für HS-Schaltanlagen. Ab 2002 Vice President F&E für Hochspannungsprodukte und Direktor des Forschungszentrum in Villeurbanne, Frankreich, bei Alstom T&D. Seit 2007 bei NOK, jetzt Axpo Power AG, Baden, im Engineering tätig. Leiter der Geschäftseinheit Engineering zum Aus-Umbau des Hochspannungsnetzes der Axpo Power AG, Netze und als Dienstleister im Engineering von Projekten der Netzinfrastruktur auf dem Drittmarkt.

Entwicklung von SF6- Hochspannungsleistungsschaltern

Christian Lindner
Axpo Power AG, Baden

1. Kurzfassung

Das Referat erläutert, welche Phasen bzw. Technologien in der Schalterentwicklung durchschritten wurden, bis man zum heutigen Durchbruch eines SF6-1-Kammerschalter für 550 kV kam.

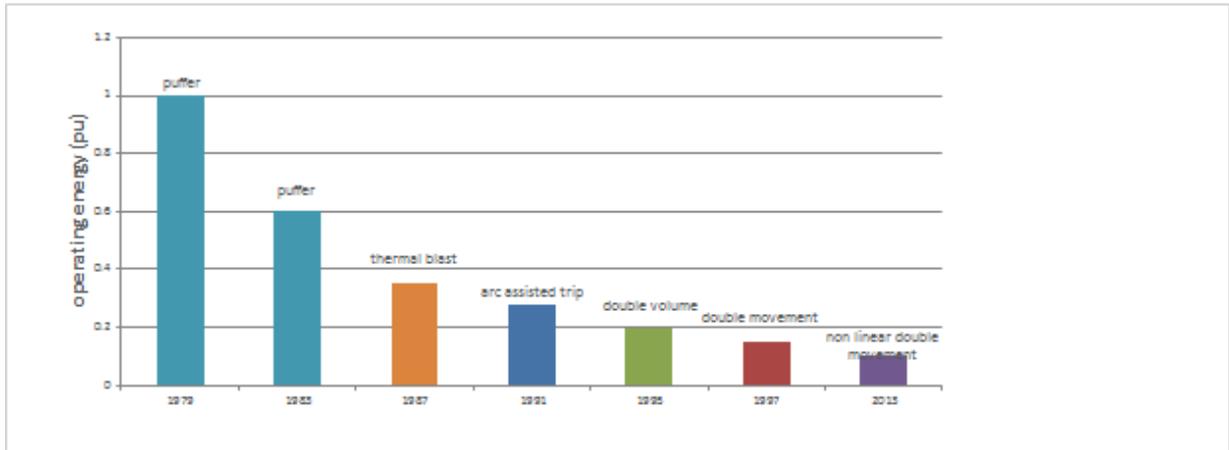
Dabei wird gezeigt, wie sich Antriebstechnologien, notwendige Antriebsenergie und Löschkammertechnologien rund um den Einsatz von SF6 entwickelt haben. Auf der Anwenderseite werden Anforderungen und Technologieeinsatz geschildert.

Das Referat gibt einen kurzen Einblick in die Entwicklungsarbeit vor 20-25 Jahren, als man noch eindimensionale Strömungsrechnungen verwendete, bis zum heutigen Einsatz von 2D- tlw. 3D-Simulationen zur Schaltkammerentwicklung.

2. Statistische Grundlagen

Die graphische Darstellung der notwendigen Antriebsenergie oder der eingesetzten Masse des Leistungsschalters zeigt indirekt die wichtigsten Entwicklungsschritte.

Evolution des Antriebsenergiebedarfs Leistungsschaltertechnologie

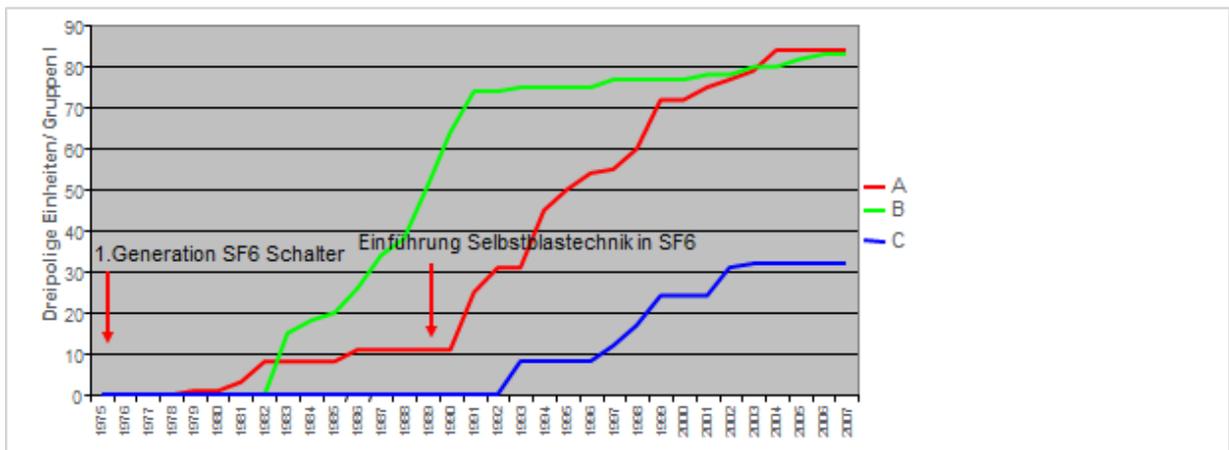


Seite 5

FKH Fachtagung 2015

Das folgende Bild zeigt die historische Entwicklung der installierten Hochspannungsschalter bei der NOKGrid (seit 1.1.2013 im Besitz der Swissgrid). Es zeigt eindeutig, wie ein Technologiesprung die Wettbewerbsfähigkeit vorangetrieben hat.

Hochspannungsleistungsschalter Schalterpopulation NOK Netze

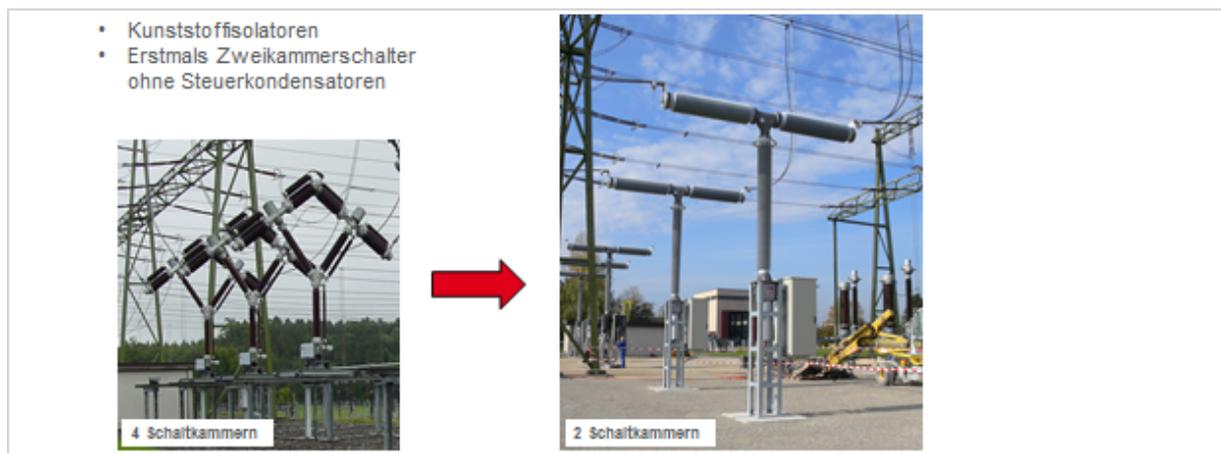


Seite 5

FKH Fachtagung 2015

Hochspannungsleistungsschalter

Ersatz 380 kV Schalter nach ca. 30 Jahren



Seite 10

FKH Fachtagung 2015

3. Schlussfolgerung

Der Hochspannungsleistungsschalter stellt ein zentrales Element in der Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie dar. In seiner Rolle als u.a. Sicherungselement zum Schutz der Netzinfrastrukturen, Person und Umwelt, soll der Schalter schlussendlich auch den vielen unterschiedlichen Anforderungen seitens Anwendern genügen.

Das Referat gibt einen Einblick über die Anforderungen und Technologieentwicklung bei SF6 Hochspannungsleistungsschaltern. SF6 ist ein Lösch- und Isoliermedium, welches seit 1938 bekannt ist, in den 70ern erstmals zur Anwendung kam, und die alten Technologien von Ölschalter und Druckluftschalter ersetzte. In den letzten 25 Jahren gab es kontinuierliche Entwicklungsschritte in der SF6 Technologie, die zu massiven Vorteilen für den Endkunden führten. Von damals bis heute gibt es neben den inkrementalen Entwicklungen eindeutige wegberreitende Meilensteine in der Technologieentwicklung. Hervorzuheben ist dabei das sogenannte Double motion Prinzip und schlussendlich das Double motion Prinzip mit nicht linearer Bewegungscharakteristik. Lange war die Schalterentwicklung im Wesentlichen geprägt von Physikern und Elektroingenieuren. Erst die multidisziplinäre Zusammenarbeit mit Ingenieuren aus dem Maschinenbau, Elektrotechnik, Physik, Informatik und der Chemie, führte zu den heute bekannten Fortschritten in der Entwicklung.

Im Referat werden Meilensteine und Entwicklungsschritte vom Referenten beschrieben, welche eine persönliche Meinung aus langjähriger Erfahrung in der Entwicklung darstellen.

Unterstützt wird dieses Referat durch Beiträge namhafter Lieferanten.

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Leistungsschalter in Kraftwerksanlagen: Konzepte und Betriebserfahrungen

Dr. Thomas Aschwanden

AF Engineers + Consultants (AFEC) GmbH, Iseltwald

Funktion und beruflicher Werdegang

- 1978 Elektroingenieurstudium und Promotion, ETHZ
- 1985 Pulsed Power Laboratory, Polytechnic University of New York
- 1990 Geschäftsleiter Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
- 1998 Leiter Abteilung Engineering Netze, BKW FMB Energie AG
- 2003 Leiter Geschäftseinheit Operations Netze, BKW FMB Energie AG
- 2005 Leiter Abteilung Projekte, Senior Engineer, Kraftwerke Oberhasli AG
- Heute: Consultant und Mitinhaber von AF Engineers + Consultants (AFEC)

Leistungsschalter in Kraftwerksanlagen: Konzepte und Betriebserfahrungen

Thomas Aschwanden

AF Engineers + Consultants (AFEC) GmbH, Iseltwald

1. Einleitung

Die Produktion von elektrischer Energie erfolgt zum überwiegenden Teil mit rotierenden Maschinen. Die elektrischen Leistungen der heute eingesetzten Erzeugereinheiten (Kraftwerksblöcke) erstrecken sich über einen sehr grossen Leistungsbereich: einige kW bei kleinen Wasserkraftanlagen bis ca. 1600 MW bei grossen Kernkraftwerken. Der vorliegende Beitrag fokussiert sich auf den Einsatz von Leistungsschaltern in grossen Wasserkraftwerken und thermische Anlagen.

In den heutigen Kraftwerksanlagen erfolgt der Anschluss von Generatoren an das Übertragungsnetz oder an das Verteilnetz in der Regel über einen Maschinen-Transformator (Step-up Transformator) und über einen Leistungsschalter. Der Leistungsschalter kann entweder direkt am Generator oder auf der Hochspannungsseite des Maschinentransformators angeordnet werden.

Solche Leistungsschalter müssen folgende Aufgaben erfüllen:

- Zuschalten: Generator synchron zum Netz
- Normalbetrieb: Betriebsströme führen
- Ausschalten: Unterbrechen von Betriebsströmen
- Fehlerfall, Kurzschlüsse: Fehlerströme unterbrechen
- Bei Pumpspeicherkraftwerken zusätzlich: Zuschalten im Motorbetrieb unter Vollast (Anfahren von Speicherpumpe).

Bei drehzahlvariablen Maschinen-Gruppen in grossen Pumpspeicherkraftwerken, welche in der Schweiz demnächst ihren Betrieb aufnehmen werden, kommen ebenfalls Leistungsschalter zum Einsatz. Diese Varspeed-Anlagen basieren auf Asynchron-Maschinen mit einem Frequenzumrichter im Rotorkreis. In diesem Varspeed-Konzept stellt das Betriebsverhalten der Asynchron-Maschine und der Frequenzumrichter mit grosser Leistung erhöhte Anforderungen an die eingesetzten Schaltgeräte.

2. Anforderungen und Normen

Die elektrischen und mechanischen Anforderungen an Leistungsschalter in Kraftwerksanlagen unterscheiden sich zum Teil deutlich von den Anforderungen, die bei Schalteranwendungen in Netz üblich sind.

Bei der technischen Spezifikation von Leistungsschaltern in Kraftwerksanlagen müssen folgende Aspekte besonders berücksichtigt werden:

- Schaltungs- und Netzanschluss-Konzept
- Generator-Daten für stationären Betrieb und transiente Zustände
- Daten des Maschinentransformators (Übersetzung, Stufenschalter, Impedanzen)
- Schaltzyklen, Betriebsregime (Grundlast, Spitzenlast, Pumpspeicher)
- Ausschaltströme im Fehlerfall
 - Netzseitige Fehler (Kurzschluss)
 - Generatorseitige Fehler (Klemmen-Kurzschluss, Fehlsynchronisation)
- Dielektrische Beanspruchungen über der Schaltstrecke
 - Wiederkehrende Spannung (TRV)
 - Steilheit der wiederkehrenden Spannung (RRRV)

Für Hochspannungs-Leistungsschalter steht seit längerer Zeit das umfassende Normenwerk IEC 62271 zur Verfügung [1]. Darin wurden bisher aber Anwendungen im Kraftwerksbereich explizit ausgeschlossen.

1993 erschien erstmals der IEEE-Standard C37.013, welcher die spezifischen Anforderungen an die mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Generator-Leistungsschalter definiert und festlegt [2]. Basierend auf dieser Grundlage und in Abstimmung mit IEEE entstand in jüngster Zeit die IEC 62271-37-013 [3]. Diese neue Norm wird in Zukunft für die gezielte Entwicklung, Spezifikation und Prüfungen von Generator-Leistungsschaltern sowohl für die Herstellerindustrie als auch für die Kraftwerksbetreiber wegweisend sein.

Generell erfordert das erfolgreiche Ausschalten eines Wechselstroms immer einen Nulldurchgang. Es können im Zusammenhang mit Generatoren stark asymmetrische Fehlerströme auftreten, bei denen Strom-Nulldurchgänge wegen einer sehr hohen und langsam abklingenden DC-Komponente ausbleiben [4], [5], [6]. Dies ist der Fall bei:

- Generator gespeisten Kurzschlüsse
- Generator Fehlsynchronisation

Solche Schaltfälle treten im Betrieb äusserst selten auf, stellen aber für den betroffenen Generatorschalter immer eine kritische Beanspruchung dar. Wenn der Fehlerstrom wegen fehlenden Nulldurchgängen im Schalter nicht innerhalb der zulässigen Lichtbogenzeit gelöscht werden kann, wird die Schaltkammer thermisch überlastet oder zerstört. Bei solchen Schaltfällen mit fehlenden Nulldurchgängen treten auch bei Generator und Maschinen-Transformator sehr hohe elektrische und mechanische Beanspruchungen auf [4].

3. Einsatz von Leistungsschaltern in Kraftwerken

In den Anfängen des 20. Jahrhunderts waren die Leistungen der Generatoren bei Wasserkraftwerken und Kohlekraftwerken noch bescheiden (typisch 10 bis 30 MW). Die Generatoren – grössere Kraftwerke umfassten immer mehrere Einheiten – wurden über

Leistungsschalter auf eine gemeinsame Kraftwerks-Sammelschiene (Generatorspannungen ca. 10 kV) geschaltet. Zum Einsatz gelangten konventionelle, im Netzbetrieb erprobte Oelstrahlschalter und später Druckluftschalter. Diese Kraftwerks-Sammelschiene war über einen Kraftwerkstransformator an das Netz angeschlossen. Anschlusskonzepte dieser Art sind bei älteren Wasserkraftanlagen immer noch im Einsatz.

Durch die stetige Steigerung der Generatorleistungen mit entsprechend höheren Betriebs- und Fehlerströmen entstand die Notwendigkeit, wegen des ungenügenden Schaltvermögens der konventionellen Netzschalter im Kraftwerk ein neuartiges Anschluss-Konzept einzuführen, bei dem jeder Generator direkt mit einem Maschinentransformator verbunden ist und mittels einem Hochspannungs-Leistungsschalter (HLS) an das Netz angeschlossen wird (HLS-Konzept, siehe Abb. 1). Durch die Anordnung des Leistungsschalters auf der Hochspannungsseite des Transformators werden die Betriebsströme im Schalter stark reduziert. Die damals erforderlichen Schaltleistungen konnten mit der Entwicklung von Hochspannungs-Druckluftschaltern erfüllt werden. Die sogenannte Blockschaltung (unit connection) wurde in den 1940er Jahren erstmals sowohl in thermischen Kraftwerken als auch in grösseren Wasserkraftwerken eingesetzt und später als Standardlösung akzeptiert.

Aufgrund der durchwegs positiven Langzeiterfahrungen im Betrieb (> 50 Jahre), wird das HLS-Konzept auch heute bei neuen Kraftwerksprojekten angewendet, weil damit kosteneffiziente Lösungen mit einer minimalen Anzahl Komponenten, kleinem Raumbedarf und geringem Instandhaltungsaufwand möglich sind.

Da beim HLS-Konzept der Generatorschalter fehlt, kann bei einem dielektrischen Fehler im Abschnitt zwischen Generator und HS-Schalter erheblicher Schaden entstehen, weil die in der noch drehenden Maschine vorhandene Energie in die Fehlerstelle fließt. Das Risiko dieses äusserst seltenen Fehlerfalls kann durch gezielte Massnahmen reduziert werden, insbesondere durch:

- gekapselte Generatorausleitung (Bus Duct)
- Verzicht auf Eigenbedarfsversorgung direkt ab Generator (siehe Abb. 1)
- höheres Isolationsniveau beim Maschinentransformator
- Generator-Schnellentregung, schneller Erdungsschalter (FES) am Generator

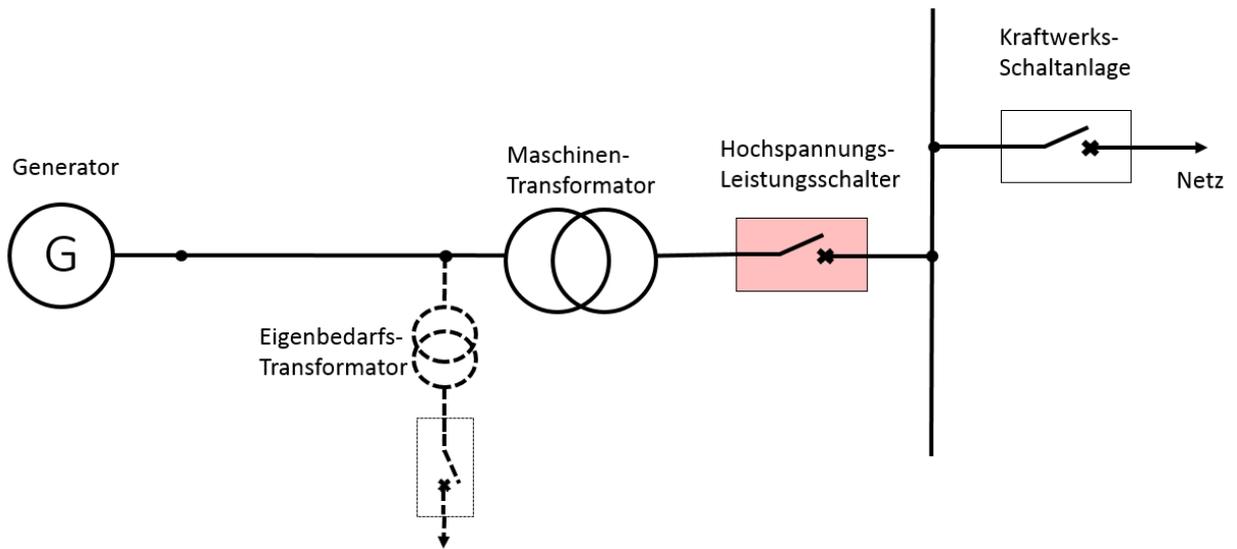


Abbildung 1: Anschluss von Generator mit Hochspannungs-Leistungsschalter (HLS-Konzept, Unit Connection)

Mitte der 1960er Jahre begann die Entwicklung von eigentlichen Generator-Leistungsschaltern (GLS) mit hohem Schaltvermögen, vorerst auf der Basis des bereits bekannten Druckluft-Löschprinzips. Ein solcher Generator-Leistungsschalter wird zwischen Generator und Maschinentransformator angeordnet (GLS-Konzept, Abb. 2) und muss demnach für die sehr hohe Betriebs- und Fehlerströme ausgelegt sein.

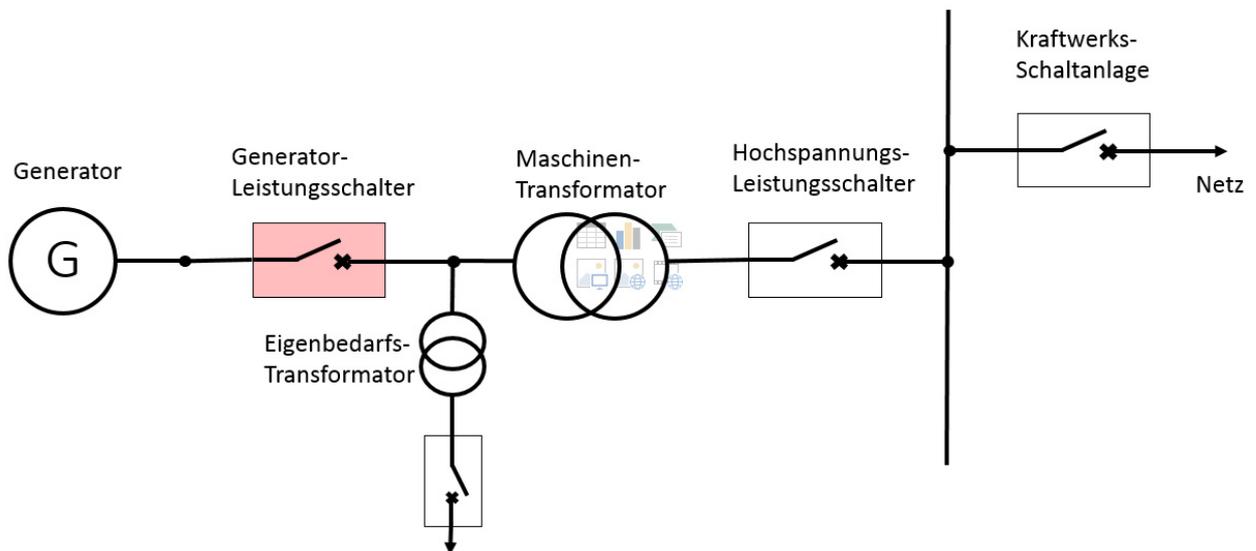


Abbildung 2: Anschluss von Generator mit Generator-Leistungsschalter (GLS-Konzept)

Das GLS-Konzept nach Abb. 2 zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Verbesserter Schutz von Generator und Maschinentransformator bei generatornahen und netzseitigen Fehlern
- Vereinfachung der Start- und Stop-Sequenzen
- Eigenbedarfsversorgung auch bei ausgeschaltetem Generator sichergestellt
- Erhöhte Verfügbarkeit des Kraftwerks oder Kraftwerkblocks
- Vorteilhafte Life-Cycle Kosten [6],[10].

In der weiteren Entwicklung des Generatorschalters in den 1980er Jahren wurde SF6 als Löschmedium eingeführt. Damit konnte das Abschaltvermögen signifikant gesteigert, die Zuverlässigkeit erhöht und der Instandhaltungsaufwand stark gesenkt werden. Bei der neusten Generation der grössten SF6-Generatorschalter mit 28 kA Nennstrom und 31.5 kV liegen die beherrschbaren Ausschaltströme bei 250 kA [6].

Neben Generatorschaltern mit Löschmedium Druckluft und SF6 hat auch der Vakuum-Schalter im Kraftwerks-Bereich Einzug gehalten. Die verfügbaren Vakuum-Schaltkammern können heute Nennströme bis zu 6 kA (mit Zwangskühlung bis 10 kA) führen, bei Bemessungsspannungen bis 24 kV. Sie erfüllen die Anforderungen der einschlägigen Normen [2],[3] und sind in der Lage, auch asymmetrische Fehlerströme bis zu 80 kA auszuschalten. Diese kompakten und wartungsarmen Schaltgeräte eignen sich für Generatoren bis ca. 180 MW Leistung. Sie eignen sich u.a. auch für Retrofit-Projekte, wenn bestehende Leistungs-Schalter in älteren Kraftwerksanlagen bei beschränkten Platzverhältnissen am Ende ihrer Lebensdauer ersetzt werden müssen.

4. Betriebserfahrungen, Schalterzuverlässigkeit

Eine möglichst hohe Verfügbarkeit bei minimalen Kosten stellt bei Kraftwerksanlagen eine übergeordnete Zielsetzung dar. Die Verfügbarkeit wird neben den Beanspruchungen im Betrieb - z.B. durch eine hohe Anzahl von Start-Stop Zyklen - durch die Auslegung des Kraftwerks (Redundanzen) und die Auswahl der Schlüssel-Komponenten bestimmt. Im kompetitiven Umfeld der Strommärkte wird bei Produktionsanlagen der Fokus zunehmend auch auf den Instandhaltungsaufwand gesetzt, da dieser Aufwand direkt in die Stromerzeugungskosten eingeht.

Wenn ein Leistungsschalter (GLS oder HLS) in einem Kraftwerk durch einen Fehler oder Defekt ausfällt, geht der betroffene Generator oder der ganze Kraftwerksblock ausser Betrieb. Aus der Fehlerhäufigkeit der Leistungsschalter und der übrigen Schlüsselkomponenten eines Kraftwerks, wie Turbinen, Generatoren und Transformatoren, kann die Verfügbarkeit von Gross-Kraftwerken abgeschätzt werden [6].

Eine breit abgestützte CIGRE-Studie hat die Fehlerhäufigkeit von SF6-Hochspannungs-Leistungsschaltern (HLS) mit Bemessungsspannungen von 60 kV bis 700 kV im Zeitraum von 2004 bis 2007 untersucht [7]. Obwohl in der Umfrage die Schalteranwendungen in Kraftwerken nicht explizit erfasst wurden, gibt die Betriebserfahrung über ca. 280'000 Schalterjahre (CB-years) wertvolle und statistisch relevante Hinweise für die Fehlerhäufigkeit von Hochspannungsschaltern (HLS) in Kraftwerksanlagen.

In der Studie wird zwischen wesentlichen Fehlern (Major Failure mit Betriebsunterbruch) und kleinen Defekten (Minor Failures ohne Betriebsunterbruch) unterschieden. In Tabelle 1 sind die Fehlerraten (Major Failures) der untersuchten Schaltertypen zusammengefasst.

Schaltertyp	Fehlerrate Major Failures pro 100 Feldjahre (CB-years)	Anteil bezogen auf erfasste Feldjahre (CB-years)
Live Tank	0.48	45%
Dead Tank	0.14	24%
GIS	0.14	31%
Total über alle Schaltertypen gemittelt	0.30	100%

Tabelle 1: Fehlerraten für SF6-Hochspannungs-Leistungsschalter (Major Failures) nach Schaltertyp über alle Spannungsklassen gemittelt [7]

Als Hauptursache für Fehler mit Betriebsunterbrüchen (Major Failure) wird in der CIGRE-Studie der Schalterantrieb angegeben (siehe dazu Abb. 3). Die hydraulischen Antriebe weisen mit 0.19 pro 100 Feldjahre die höchste und die Federkraftantrieb mit 0.14 pro 100 Feldjahre die kleinste Fehlerrate auf.

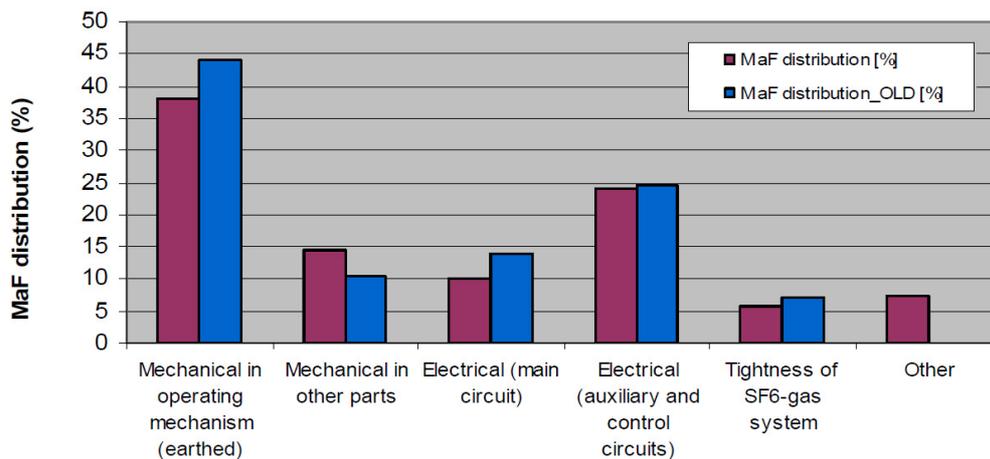


Abbildung 3: Fehlerursachen (Major Failures, blaue Balken) für SF6-Hochspannungsleistungsschalter über alle Schaltertypen und Spannungsklassen gemittelt (rote Balken: Vergleich mit CIGRE 1988-91) [7]

Die Art der Schalteranwendung und die Anzahl der Schalthandlungen spielt bei der Fehlerhäufigkeit eine wesentliche Rolle. Ein Vergleich der Schalthäufigkeiten mit den ausgewerteten Fehlerraten pro Anwendungsbereich in Tabelle 2 zeigt, dass die ermittelten Fehlerraten mit der Anzahl der Schaltspiele korrelieren. Dieser Zusammenhang ist mit Blick auf Leistungsschalter-Anwendungen in Spitzenlast- und Pumpspeicherkraftwerken von grosser Bedeutung, weil dort Leistungsschalter aufgrund des marktgetriebenen Kraftwerkeinsatzes eine sehr hohe Anzahl von Schaltzyklen aufweisen. Beispielhaft sei hier das Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2 erwähnt, wo bei den SF6-Leistungsschaltern der Motor/Generatoren im Umwälzbetrieb mehr als 2000 Schaltspiele pro Jahr zu verzeichnen sind [8].

Schalteranwendung	Anzahl Schaltungen Mittelwert pro Schalter und Jahr	Fehlerraten Major Failures pro 100 Feldjahre (CB-years)
Freileitungen	38	0.25
Transformatoren	38	0.22
Kabelanlagen	13	0.09
Shunt-Reaktoren	279	2.46
Kondensatoren	114	1.04
Kuppelschalter von Sammelschienen	22	0.33
Andere Anwendungen	173	0.44
Total	69	0.30

Tabelle 2: Mittelwert der Anzahl Schaltungen von SF6-Hochspannungsschaltern mit Major Failures, ausgewertet nach Anwendungsbereichen. In [7] wird angenommen dass ein wesentlicher Teil der Kategorie „Andere Anwendungen“ Schalteranwendungen von Kraftwerken sind

Aussagen über Fehlerraten von Generator-Leistungsschaltern (GLS), welche gemäss GLS-Konzept (Abb. 2) direkt am Generator angeschlossen sind, lassen sich wegen der unterschiedlichen Bauart und Betriebsbeanspruchungen nicht aus Resultaten der erwähnten CIGRE-Studie [7] ableiten. Um belastbare Fehlerraten von Generator-Schaltern zu ermitteln, sind in einer grossangelegten Studie alle wesentlichen Fehler und Defekte an Generatoren eines grossen Herstellers im Zeitraum von 1970 bis 2011 weltweit untersucht worden [10]. Die Untersuchung basiert auf einer Betriebserfahrung von rund 53'000 Schalterjahren. Die ermittelten Fehlerraten für Generator-Schalter mit Druckluft und mit SF6 als Löschmedium sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Generator-Schalter Technologie	Fehlerrate Major Failures pro 100 Feldjahre (GCB-years)	Anteil bezogen auf erfasste Feldjahre (GCB-years)
Druckluft-Schalter	0.666	27%
SF6-Schalter mit pneumatischem Antrieb	0.244	28%
SF6-Schalter mit Federspeicher-Antrieb	0.120	45%

Tabelle 3: Fehlerraten für Generator-Leistungsschalter (Major Failures) nach Technologie

Wie die Altersverteilung in Abb. 4 zeigt, ist das Druckluft-Prinzip weitgehend durch die zuverlässigere SF6-Technologie ersetzt worden. Heute kommen als Generator-Schalter fast ausschliesslich SF6-Schalter mit Federspeicher-Antrieben und Vakuumschalter zum Einsatz.

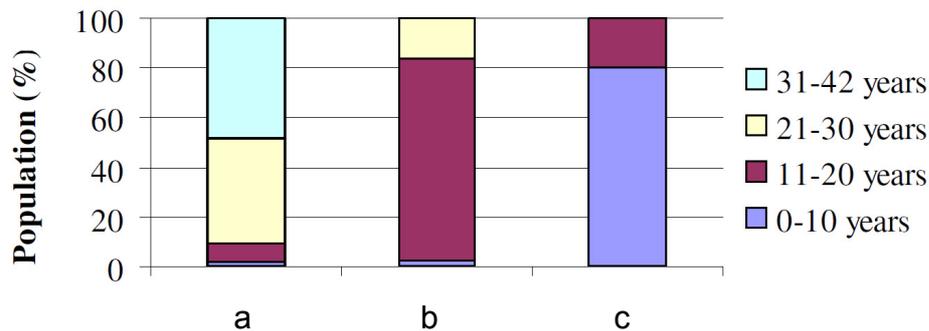


Abbildung 4: Generatorschalter-Technologien und Altersverteilung [10]

- a: Druckluft-Schalter
- b: SF6-Schalter mit penmatischem Antrieb
- c: SF6-Schalter mit Federspeicher-Antrieb

5. Schlussfolgerung

Der aktuelle Stand der technischen Entwicklung der Hochspannungs-Leistungsschalter (HLS) und der Generatorschalter (GLS) gestattet, dass Kraftwerksanlagen mit Generatoren aller Leistungsklassen sicher und mit hoher Verfügbarkeit betrieben werden können.

Mit IEC 62271-37-013 steht eine neue international anerkannte Norm für die Entwicklung, Spezifikation und für die Prüfung von Generatorschaltern zur Verfügung. Die IEC 62271 für Hochspannungsschalter deckte die Bedürfnisse in Kraftwerken nur bedingt ab, da in diesem Normenwerk Kraftwerks-Anwendungen bisher explizit ausgeschlossen waren.

Generatornahe Kurzschlüsse und Fehlsynchronisation führen zu stark asymmetrischen Fehlerströmen mit hohem DC-Anteil. Diese Schaltfälle stellen sowohl für Generator-Schalter als auch für die Schalter auf der Hochspannungsseite des Maschinentransformators eine äusserst kritischste Beanspruchung dar. Wenn nach Kontakt-trennung der Lichtbogen im Schalter wegen fehlenden Nulldurchgängen nicht innerhalb der zulässigen Lichtbogenzeit gelöscht werden kann, wird die Schaltkammer thermisch überlastet oder zerstört. Bei solchen Schaltfällen mit fehlenden Null-durchgängen können auch bei Generator und Maschinen-Transformator sehr hohe elektrische und mechanische Beanspruchungen auftreten.

Der Anschluss eines Generators ans Netz erfolgt entweder über einen Schalter auf der Hochspannungsseite des Maschinentransformators (HLS-Konzept) oder über einen Generator-Leistungsschalter, welcher zwischen Generator und Maschinentransformator angeordnet ist (GLS-Konzept). Kraftwerke mit hohen Verfügbarkeitsanforderungen werden durchwegs nach GLS-Konzept ausgeführt.

Aufgrund der positiven Langzeiterfahrung mit dem HSL-Konzept besteht keine Veranlassung, in bestehenden oder auch neuen Anlagen das einfachere und wirtschaftlich günstigere HLS-Konzept zu verlassen. Beim HLS-Konzept ist zu beachten, dass bei einem dielektrischen Fehler, der im Abschnitt zwischen Generator

und HS-Schalter auftritt, erheblicher Schaden entstehen kann. Durch gezielte Massnahmen kann das Risiko von solchen Fehlern reduziert werden.

Die heutigen Generator-Schalter basieren auf zwei unterschiedlichen Technologien: Schalter mit SF6-Löschmedium (bis 250 kA Ausschaltstrom) und Vakuum-Schaltröhren (bis 80 kA Ausschaltstrom). Beide Technologien sind ausgereift und werden von mehreren Herstellern angeboten.

Bei den Hochspannungsschaltern (HLS-Konzept) hat sich auch bei Kraftwerksanwendungen der SF6-Blaskolbeschalter durchgesetzt. Meist sind diese Hochspannungsschalter (HLS) in der Kraftwerks-Schaltanlage integriert.

Durch weltweite Umfragen der CIGRE können heute statistisch belastbare Aussagen über die Fehlerraten sowohl von SF6-Hochspannungs-Leistungsschaltern (HLS) als auch für Generator-Leistungsschaltern (GLS) gemacht werden. Die über alle Schaltertypen und Spannungsklassen gemittelte Fehlerrate liegt bei SF6-Hochspannungsschaltern bei 0.3 Major Failures bezogen auf 100 Feldjahre. Die Fehlerrate für SF6-Generatorschalter mit Federspeicher-Antrieb beträgt 0.12 Major Failures bezogen auf 100 Feldjahre. Diese Fehlerraten konnten durch die laufende technische Entwicklung reduziert werden.

Schalterausfälle (Major Failures) werden bei allen Schaltertypen durch Fehler im Schalter-Antrieb verursacht. Das zuverlässigste Antriebskonzept ist der Federspeicher-Antrieb.

Ein Vergleich der Schaltheufigkeiten mit den ausgewerteten Fehlerraten zeigt, dass die ermittelten Fehlerraten mit der Anzahl der Schaltspiele der untersuchten Schalter korrelieren. Dieser Zusammenhang ist für die Verfügbarkeit und die Strategie für die Schalter-Instandhaltung in Spitzenlastkraftwerken und Pumpspeicherkraftwerken von grosser Bedeutung, weil dort Leistungsschalter aufgrund des marktgetriebenen Kraftwerkeinsatzes eine sehr hohe Anzahl von Schaltzyklen aufweisen.

6. Literatur

- [1] IEC 62271-1 (2001), High Voltage Switchgear and Controlgear, Part 1: Common Specifications (sowie weitere Teile dieser Nomenreihe).
- [2] IEEE Std C37.013-1997 (R2008), Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, mit Amendment 1 in IEEE Std C37.013a (2007): Supplement for Use with Generators 10-100 MVA.
- [3] IEC 17A/1074 FDIS, IEC 62271-37-013 Ed.1, High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 37-013: Alternating Current Circuit Breakers, 2015.
- [4] I.M. Canay, D. Braun, G.S. Koepl: Fehlende Stromnulldurchgänge bei Fehlsynchronisation von Generatoren, Bulletin SEV/VSE, 1/1998, S. 24-31.
- [5] R.W. Long, D. Mitchell, L.E. Younce: Equipment Life Extension and Modernization of Generator Circuit Breakers, EATON White Paper WP 182002EN, Sept. 2014.
- [6] M. Palazzo, G. Cavaliere: Impact of New Generator Circuit-Breaker Technologies on Nuclear Power Station Protection, Availability and Profitability, Nuclear Espana, April 2013.

- [7] CIGRE WG A3.06, Final Report of the 2004-2007 International Enquiry of High Voltage Equipment, Part 2 – Reliability of High Voltage SF6 Circuit Breakers, CIGRE Technical Brochure No. 510, 2012.
- [8] Th. Aschwanden: 30 Jahre Betriebserfahrung mit der 220-kV-GIS im Pumpspeicherkraftwerk Grimsel 2, FKH-/VSE-Fachtagung “Gekapselte Schaltanlagen“, 2010.
- [9] D. Braun, A. Guerig: Life Management for Generator Circuit-Breaker, CIGRE Main Session, Paris, 1994, Paper 13-204.
- [10] M. Palazzo, D. Braun, G. Cavaliere, K. Dahinden, R. Eberle, W. Kiechl, M. Lakner: Reliability Analysis of Generator Circuit-Breakers, CIGRE Main Session, Paris, 2012, Paper A3-206.

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Vakuumschaltröhren bei höheren Spannungen

Dr.-Ing. Jörg Teichmann

Siemens AG, High Voltage Products, Berlin

Funktion und beruflicher Werdegang

Dipl.-Ing. Elektrotechnik, Ruhr-Universität-Bochum 1995

Siemens AG, Corporate Technology, Erlangen, 1995-1998

Promotion Dr.-Ing. Elektrotechnik, Ruhr-Universität-Bochum 1998

Siemens AG, Entwicklung von Gasisolierten Schaltanlagen, Mittelspannung 1998-2009

Siemens AG, Entwicklungsleiter Vakuumschaltröhren, 2009-2011

Siemens AG, Entwicklungsleiter Hochspannungs Leistungsschalter, 2012-2015

Siemens AG, Entwicklungsleiter Luftisolierte Hochspannungsschaltanlagen, 2015

Vakuumschaltröhren bei höheren Spannungen

Jörg Teichmann

Siemens AG, High Voltage Products, Berlin

1. Kurzfassung

Gegen Ende der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts begann der technologische Siegeszug der Vakuumschalter in der Mittelspannung. Durch ihre großen Vorteile wie hohe Kompaktheit und Zuverlässigkeit, geringe Antriebsenergie und komplette Wartungsfreiheit verdrängten sie nach und nach die bis dahin etablierten SF₆-Schalter und Ölschalter. Die anfänglichen Nachteile wie hohe Kosten oder auch im Netz aufgetretene Überspannungen infolge des Stromabrisseffektes konnten durch intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Fertigung und der Materialwissenschaften komplett beseitigt werden. Mit Einführung der Verschlusslöttechnik gegen Ende der 1990er Jahre konnte ein neuer Meilenstein in der Fertigungstechnologie bestritten werden, mit dem ein noch kompakteres Design möglich wurde. Mit diesem Meilenstein wurde auch der Weg zu höheren Spannungen geebnet. So konnten auch bald nach Einführung der Verschlusslöttechnik die ersten Vakuumschaltröhren im Bereich der Hochspannung bei 72,5 und 145 kV gefertigt werden. Um die Vakuumschaltröhren bei diesen hohen Spannungen zuverlässig anwenden zu können müssen diese so entwickelt werden, dass neben dem Kurzschlussstromverhalten auch das kapazitive und induktive Schaltvermögen sichergestellt ist. Hier wird ein kurzer Abriss gegeben, welche Modifikationen an existierenden Mittelspannungsröhren durchgeführt werden müssen, um hier erfolgreich zu sein.

2. Aufbau der Schaltröhre und Schaltfälle

2.1 Kurzschlusschalten

In der Anwendung von Vakuumschaltröhren in der Hochspannung ergeben sich einige technische Probleme, die mit der Lichtbogenbeherrschung in den Vakuumschaltröhren in Zusammenhang stehen und die vor deren Verwendung in Leistungsschaltern gelöst werden müssen. Zur Vermeidung der Kontaktüberlastung besonders bei hohen Kurzschlussströmen wird der Lichtbogen im Kontaktzwischenraum einem Magnetfeld ausgesetzt. Dieses Magnetfeld besitzt entweder eine radiale Struktur und zwingt so den Lichtbogen aufgrund der Lorentzkraft zu einer Rotation oder aber ist parallel zum Stromfluss im Lichtbogen gerichtet, so dass von einem axialen Magnetfeld gesprochen wird, das den Schaltlichtbogen in einem diffusen Lichtbogenmodus mit geringer Stromdichte auf den Kontaktflächen hält. In beiden Fällen erzeugt der Ausschaltstrom selbst durch eine entsprechende Strombahn innerhalb der Schaltkontakte das Magnetfeld. Der Kontaktzwischenraum wirkt dann wie der Luftspalt einer elektromagnetischen Spule, in dem der Schaltlichtbogen entsprechend positiv beeinflusst wird. Dieser Mechanismus ist sehr ausgereift für

Mittelspannungsanwendungen mit Luftspatllängen bzw. Kontaktabständen von maximal ca. 20 mm. Mit steigendem Kontaktabstand werden radialmagnetische beeinflusste Lichtbögen schwerer beherrschbar und in der Lichtbogenstruktur immer instabiler. Dies führt zu einer verstärkten Wechselwirkung des Lichtbogens mit Elementen, die sich außerhalb des Kontaktzwischenraumes befinden, wie z.B. dem Dampfschirm, der die Keramiken der Schaltröhre schützt. Lichtbögen in axial magnetisierten Kontaktzwischenräumen weisen diese starken Instabilitäten nicht auf, so dass diese Magnetfeldgeometrie bevorzugt bei großen Kontaktabständen verwendet wird.

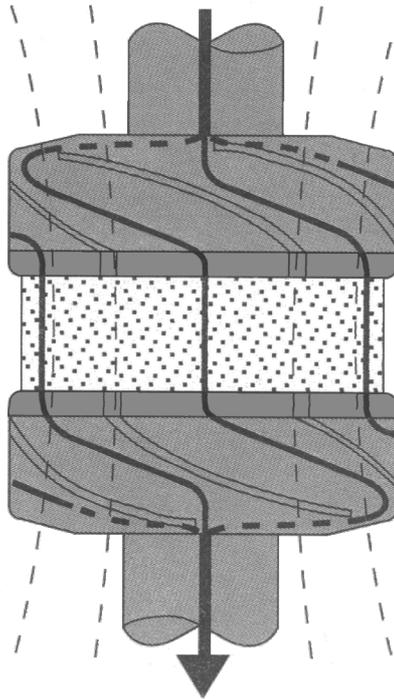


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Lichtbogens im axialen Magnetfeld

Bei Hochspannungsanwendungen muss der Kontakthub aus dielektrischen Gründen ausgehend von bestehenden 36 kV Vakuumschaltröhren je nach Zielspannungsebene um den Faktor 2-4 gesteigert werden. Dies führt zum einen zur Anwendung der Axialfeldgeometrie und zum anderen zwangsläufig zu einer drastischen Reduzierung des Magnetfeldes im Kontaktzwischenraum. Zum Beherrschen der erforderlichen, großen Kontaktabstände ist eine Optimierung des Magnetfeldes notwendig. Hierfür wurde mittels Magnetfeldsimulationen unter Berücksichtigung des Stromflusses in den Kontaktscheiben eine Geometrie gefunden, mit der der Lichtbogen auch bei den erforderlichen Kontaktabständen bei hohen Kurzschlussströmen im diffusen Modus gehalten werden konnte.

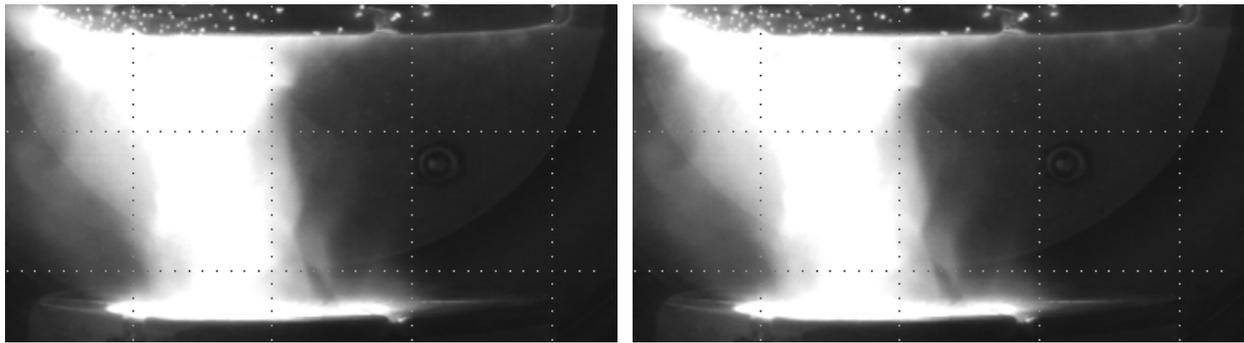


Abbildung 2: Lichtbogen links vor, rechts nach der Optimierung des axialen Magnetfeldes

Damit wurde die Grundlage geschaffen, Kurzschlussströme in Vakuumschaltröhren auch bei Abständen zu beherrschen, die für die dielektrischen Auslegungen bei Anwendungen im 72,5kV bzw. 145 kV Bereich erforderlich sind.

2.2 Kapazitives Schalten

Beim kapazitiven Schalten mit dem Vakuumschalter spielt die Kontaktgeometrie und die Magnetfeldgeometrie aufgrund der kleinen zu schaltenden Ströme keine Rolle. Vielmehr ist hier der schnelle Aufbau eines dielektrisch festen Kontaktzwischenraumes entscheidend für den Ausschaltvorgang. Die dielektrische Festigkeit in einer Vakuumschaltröhre ist - anders als bei Gasschaltern - nicht nahezu ausschließlich abhängig von der Makrogeometrie, also Feldstärke und Kontaktabstand. Vielmehr wird das Ausschalten bei der Vakuumschaltröhre durch den mikroskopischen Aufbau der Kontakte sowie das Vorhandensein von Partikeln und Fremdschichten beeinflusst. Beide Faktoren sind das Ergebnis erstens des Herstellverfahrens der Vakuumschaltröhre und zweitens der Vorbelastung der Schaltröhre. In bezug auf das Herstellverfahren sind die Reinheit der Bauteiloberflächen durch entsprechende Vorbehandlungen sowie das speziell modifizierte Konditionierverfahren zu nennen.

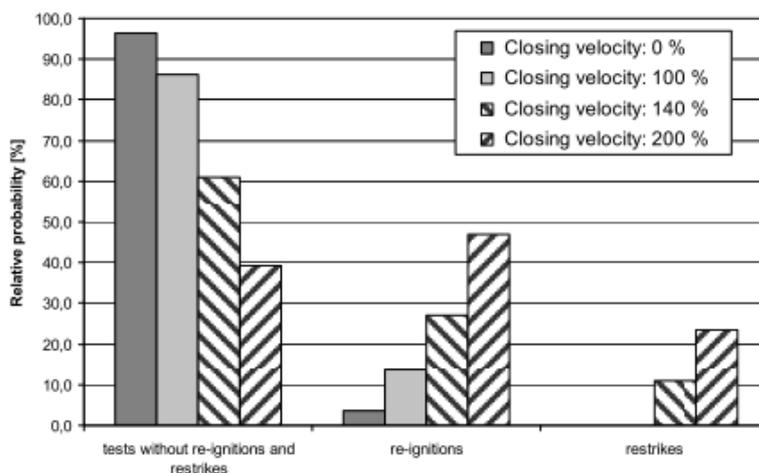


Abbildung 3: Wiederzündwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Einschaltgeschwindigkeit [1]

Dagegen ist bei der Vorbelastung der Vakuumschaltröhre besonders auf den Einschaltvorgang beim kapazitiven Schalten zu achten. Giere et.al. [1] wiesen nach, dass eine zu hohe Einschaltgeschwindigkeit zu einer Dekonditionierung der Kontaktoberflächen führt und so die Wahrscheinlichkeit von Wiederezündungen erhöht wird. (Abb. 3)

Durch die Beachtung der genannten fertigungstechnischen Besonderheiten sowie die entsprechende Ausgestaltung des Schaltgerätes ist sicher gewährleistet, dass ein Vakuumschalter auch im Hochspannungsbereich das kapazitive Schalten beherrscht.

2.3 Schalten induktiver Lasten

Während der Einführung der Technologie der Vakuumschalter war das Schalten von induktiven Lasten ein Hemmschuh für deren Verbreitung. Das physikalische Phänomen, das diesem Problem zu Grunde liegt ist der Stromabriss- oder Choppingeffekt. Der Schaltlichtbogen im Vakuum lebt von der Verdampfung von Metall aus den Kontaktoberflächen aus den Fußpunktbereichen des Lichtbogens. Ein mikroskopischer Fußpunkt des Lichtbogens im diffusen Lichtbogenmodus benötigt etwa 3-5 A, um aufrechterhalten zu werden. Fällt der Strom unter diese Grenze, verlöscht der Fußpunkt abrupt. In der Nähe des Stromnulldurchganges kommt es dann zum Abreißen des Stromes mit einer Stromsteilheit im A/ μ s-Bereich. Dieser Abriss kann beim Schalten induktiver Lasten zu einer dielektrischen Überlastung der Betriebsmittel führen oder auch im Schalter ungewollte Effekte wie multiple Wiederezündungen hervorrufen.

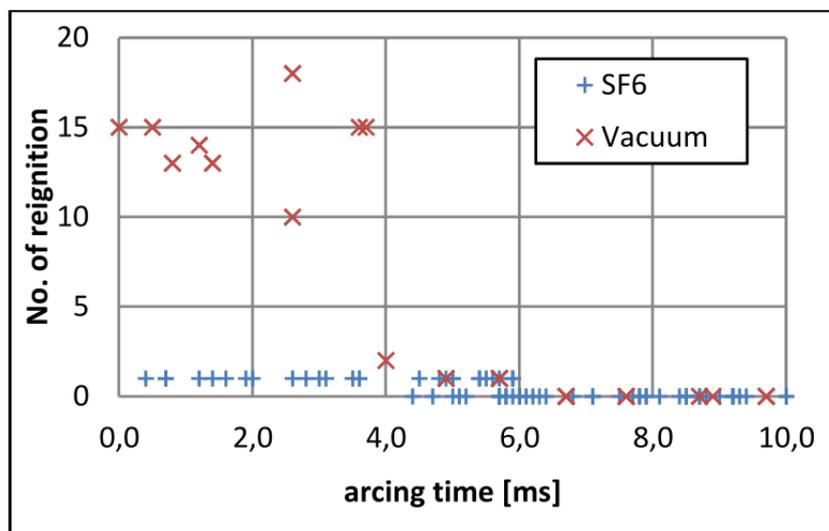


Abbildung 4: Wiederezündungen beim Schalten induktiver Lasten [2]

Mit dem zunehmenden Wissensstand zum Schalten im Vakuum wurde das Kontaktmaterial soweit verbessert, dass das Schalten von induktiven Lasten heute kein Problem mehr darstellt. Richter et.al. [2] wiesen nach, dass bei entsprechender Wahl des Lichtbogenfensters das Schalten von induktiven Lasten von Vakuum und SF₆ Schaltern nahezu vergleichbar ist. So ist die Technologie des Vakuumschalters auch zum Schalten von induktiven Lasten in der Hochspannungstechnik geeignet.

3. Schlussfolgerung

In einer Reihe von absichernden Versuchen wurde nachgewiesen, durch welche Maßnahmen es gelingt, Vakuumschaltröhren für die Anwendungen im Hochspannungsbereich zu ertüchtigen und somit den Weg zu ebnen, diese Technologie auch im Hochspannungsbereich anzuwenden.

Im Jahr 2011 wurden zur Felderprobung eine Reihe von 72,5 kV Lifetank Schaltern im Netz installiert und der direkten Erprobung im Alltagsbetrieb ausgesetzt. Diese Schalter sehen im Jahresmittel etwa 100 Schalthandlungen mit Stromstärken, die in den Teillast Kurzschlussbereich hineingehen. Jeder einzelne dieser Schalter verhält sich vollkommen unauffällig, so dass hier von einer absolut erfolgreichen Netzerprobung gesprochen werden darf. Prinzipiell steht auch der Anwendung in höheren Spannungsebenen nichts im Wege, so dass von einer zukünftigen Pilotierung in diesem höheren Spannungsreich ausgegangen werden darf.

[1] Giere et. al.: **Capacitive Current Switching Capability of 72.5 kV High-Voltage Vacuum Interrupters**, XXVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Tomsk, Russia - September 02 – September 07, 2012

[2] Richter et al: **Comparison of Switching Behavior of 145 kV Vacuum and SF6 Circuit-Breakers in the case of Switching off Shunt Reactor Currents** CIGRE, Auckland 2013

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

420 / 550kV GIS Leistungsschalter

Dipl. Ing. Robert Lüscher

Alstom Grid GmbH, Oberentfelden

Funktion und beruflicher Werdegang

- Elektrotechnikstudium und Abschluss als Elektroneningenieur an der FH Nordwestschweiz
- Eintritt in die Firma Sprecher + Schuh Hochspannungstechnik, heute ALSTOM Grid AG
- Inbetriebsetzungs- und Serviceingenieur für Hochspannungsanlagen
- Projektleitung, Entwicklung von on-line Monitoring Systemen für Hochspannungsleistungsschalter
- Projektleitung Primärsensoren (Strom/Spannung) für NCIT in GIS
- Teamleitung, Applikationen von Federspeicherantrieben für Leistungsschalter
- Teamleitung, SF6 Anlagen Versuche, Entwicklung und Typprüfung von GIS-Schaltanlagen
- Abteilungsleitung, GIS Entwicklung in der Schweiz
- Mitglied im Normengremium der IEC 62271-203 und dem nationalen TK17A/C

420 / 550kV GIS Leistungsschalter

Robert Lüscher

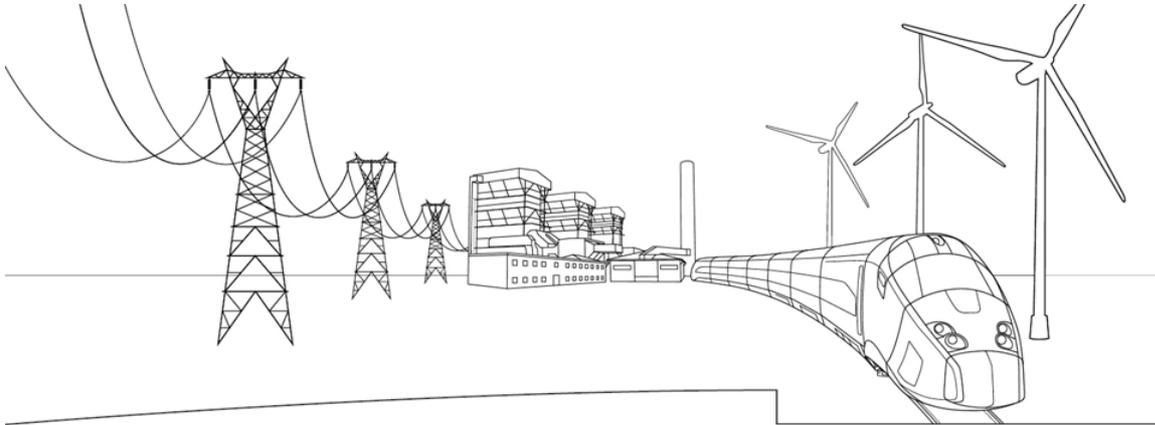
Alstom Grid GmbH, Oberentfelden

1. Kurzfassung

Die Historie und Evolution der Leistungsschalterdesigns auf der Netzebene 420 / 550kV über die vergangenen 40 Jahre wird aufgezeigt. Die wesentlichen Entwicklungsschritte der Schaltkammern und den dazugehörigen Leistungsschalterantrieben werden anhand ausgesuchter Beispiele detailliert erläutert.

Aktuellste Möglichkeiten der Simulation eines Leistungsschalters (Kinematik, Feldverteilung, Gasströmung, Löschverhalten), Design der Unterbrechereinheit und Integration des Leistungsschalterantriebes werden besprochen. Abschliessend wird Optimierung und Verifikation des gesamten Leistungsschalters durch Tests aufgezeigt.

2. Folien zu Inhalt



420 / 550kV GIS Leistungsschalter

Robert Lüscher – Entwicklungsleiter GIS

24. November 2015

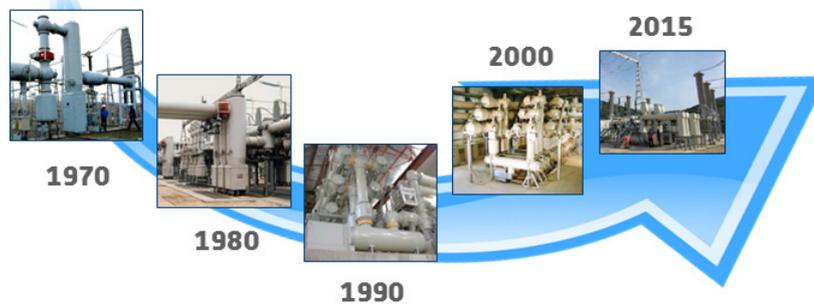
ALSTOM
Shaping the future

Agenda

- Evolution der 420 / 550 kV GIS Leistungsschalter
 - Mehrfach → Einzelunterbrecher
 - Schalterprinzipien
 - Antriebsprinzipien
- Simulationstools
 - Makroskopische Werkzeuge
 - Mikroskopische Werkzeuge
- Schalterprüfungen
- Ausblick

Evolution der 420 / 550 kV GIS Leistungsschalter

GIS Schalter	S155 FB3	T155 FB2T	B142 FB16	T155 CB2	T155 CB3
Ur [kV]	420	550	420	550	420
Ik [kA]	40	63	50	63	63
Antrieb	hydraulic	hydraulic	hydraulic	spring	spring
Eo [kJ]	25	25	25	7	4
Unterbrecher	3	2	1	2	1



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 3
© ALSTOM 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

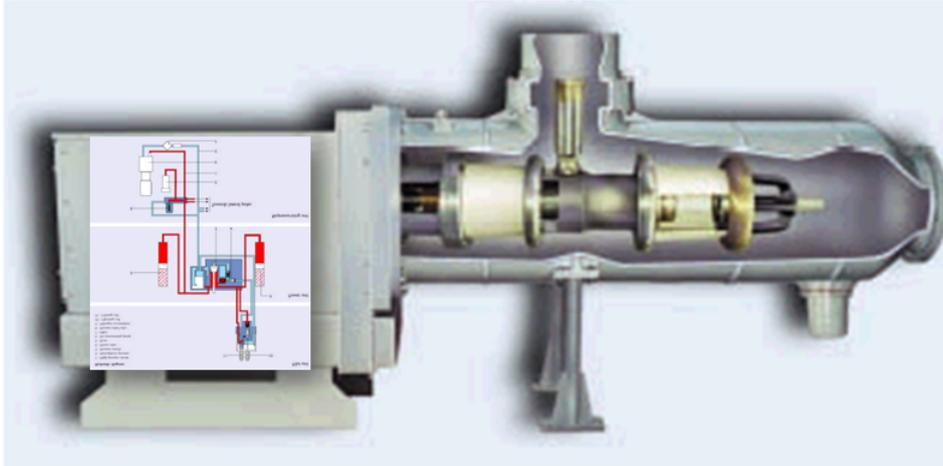
420kV - 50kA Einfachunterbrecher mit Hydraulikantrieb



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 4
© ALSTOM 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

420kV - 50kA Einfachunterbrecher mit Hydraulikantrieb



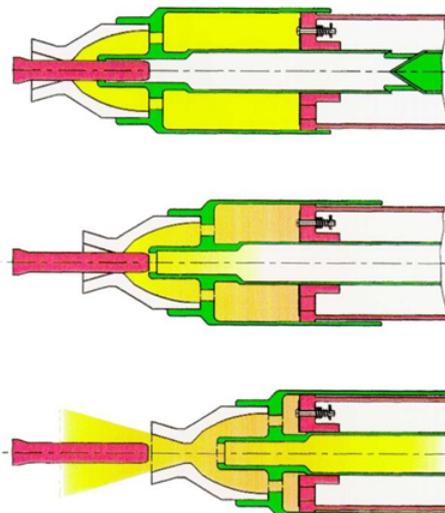
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 5

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

420kV - 50kA Einfachunterbrecher mit Hydraulikantrieb

Klassischer „Puffer-Schalter“



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 6

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

550kV - 63kA Doppelunterbrecher mit Federspeicherantrieb

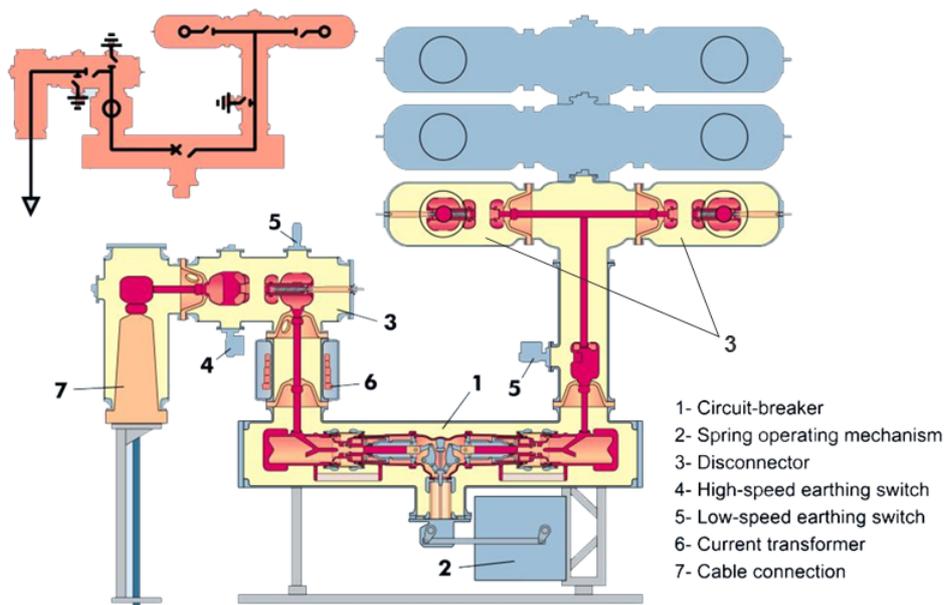


420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 7

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



550kV - 63kA Doppelunterbrecher mit Federspeicherantrieb

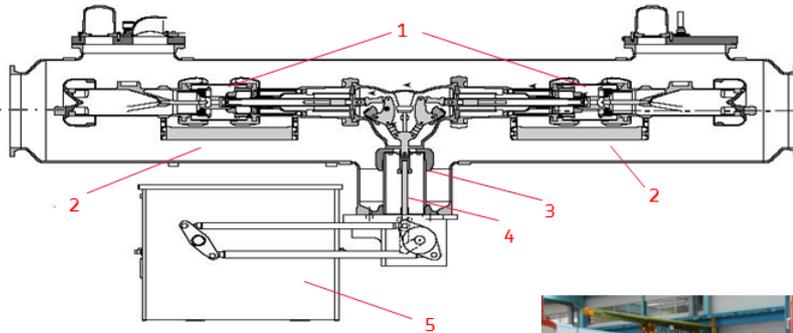


420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 8

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



550kV - 63kA Doppelunterbrecher mit Federspeicherantrieb



- 1 – Unterbrecher**
- 2 – Kondensatoren**
- 3 – Stützisolator**
- 4 – Schaltstange (isoliert)**
- 5 – Federspeicherantrieb FK3-12**



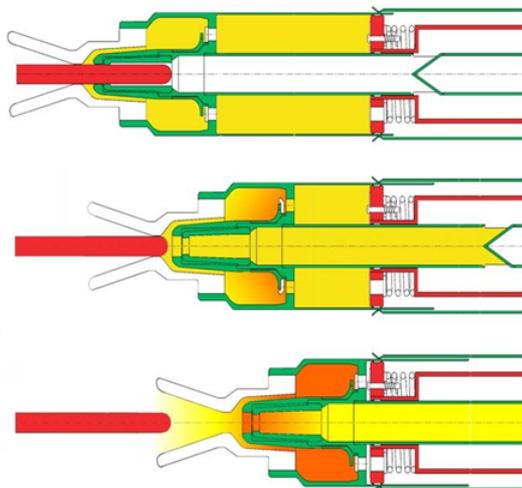
Doppelunterbrecher in der Montage

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter – P 9
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

550kV - 63kA Doppelunterbrecher mit Federspeicherantrieb

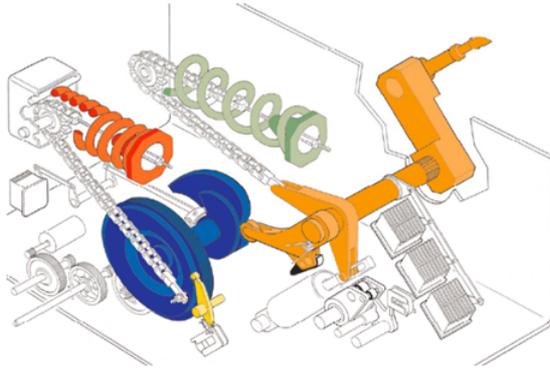
Double volume & double valve - thermal selfblast technology



GIS-Family F35 from 72,5kV to 170kV - 03/11/2015 - P 10
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, (given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

550kV - 63kA Doppelunterbrecher mit Federspeicherantrieb



- Federspeicherantrieb mit der höchsten Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit, getrimmt für präzise Schaltzeiten und Langlebigkeit (>40J)
- Auf wenige Teile reduziertes Ausschaltensystem garantiert optimale Performance für lange Stillstandszeiten im Netz.
- Kein Verlust der Ausschaltenergie, Energie-Speicherung in EIN- und AUS-Federn.

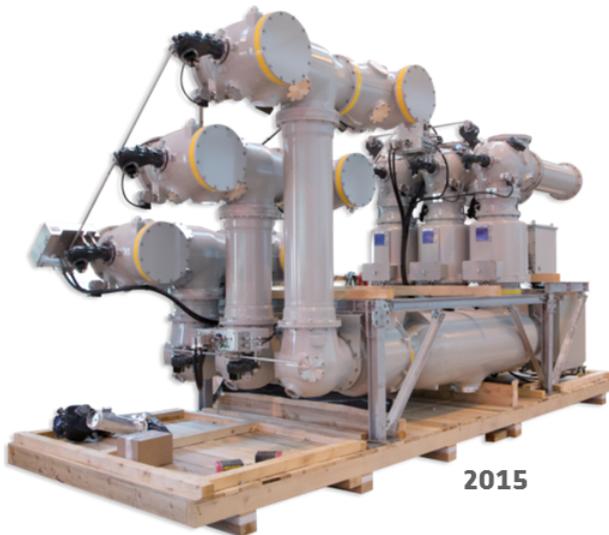
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 11

© ALSTOM 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

11

420kV - 63kA Einfachunterbrecher mit Federspeicherantrieb (double-motion)

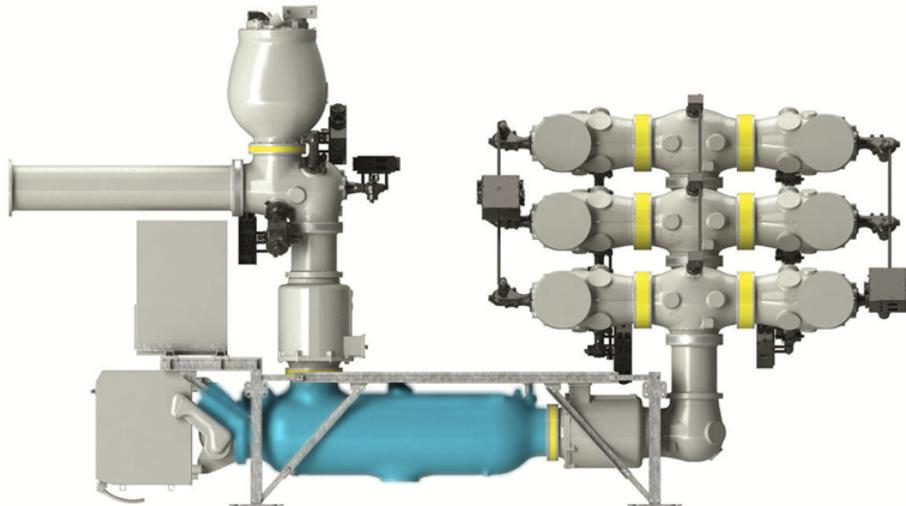


420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 12

© ALSTOM 2015. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

420kV - 63kA Einfachunterbrecher mit Federspeicherantrieb (double-motion)

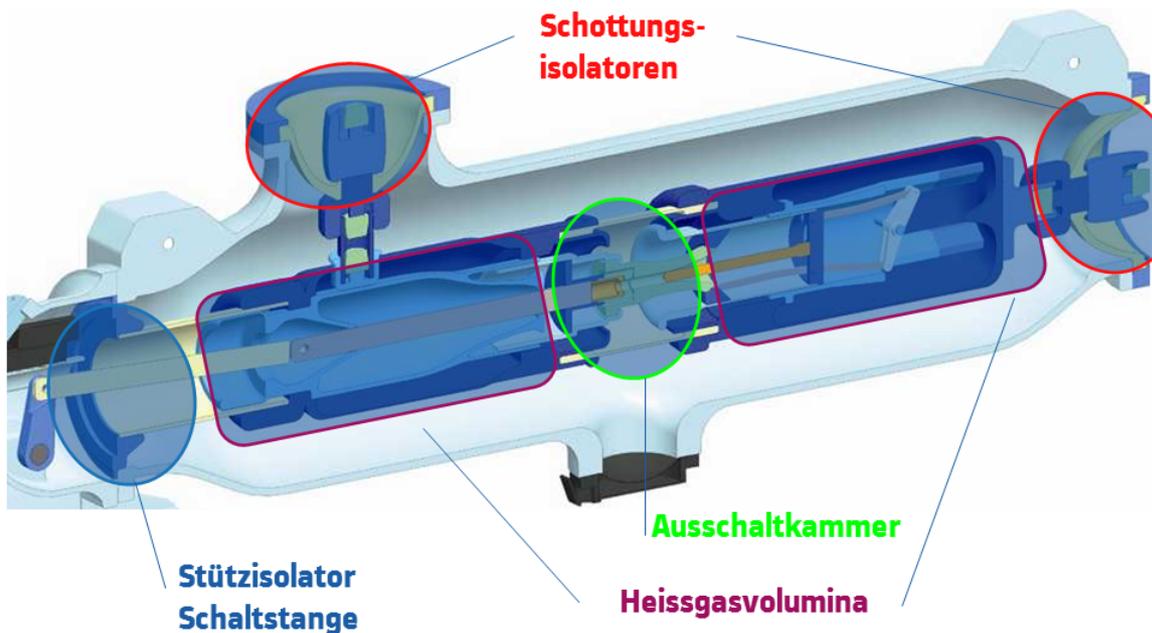


420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 13

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, explicit or implied, should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

420kV - 63kA Einfachunterbrecher mit Federspeicherantrieb (double-motion)



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 14

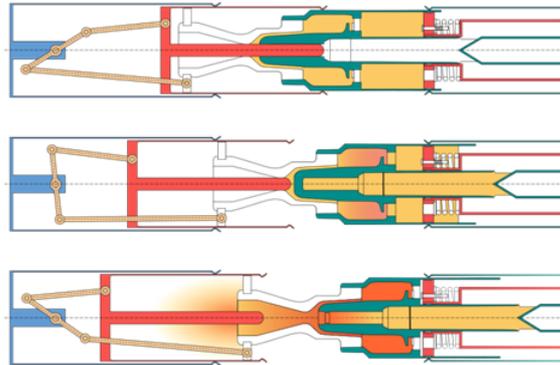
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, explicit or implied, should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM

420kV - 63kA Einfachunterbrecher mit Federspeicherantrieb (double-motion)

Double-Motion

- Die Schaltkontakte werden beidseitig bewegt mit der halben Geschwindigkeit.
- Der Antrieb muss in etwa $\frac{1}{4}$ der kinetischen Energie liefern im Vergleich zu einem «Single-Motion» Prinzip. Insgesamt lässt sich in etwa eine Reduktion der Antriebsenergie von 40% erreichen.
- **Video Ausschaltung !**

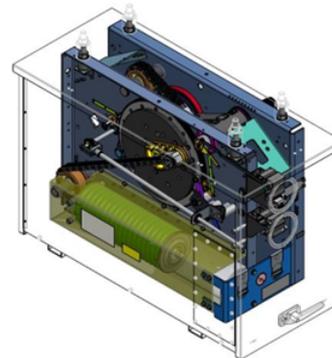
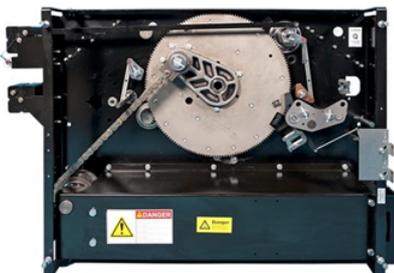


420kV / 550kV GIS Leistungsschalter--P 15
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

420kV - 63kA Einfachunterbrecher mit Federspeicherantrieb (double-motion)

Federspeicherantrieb FK

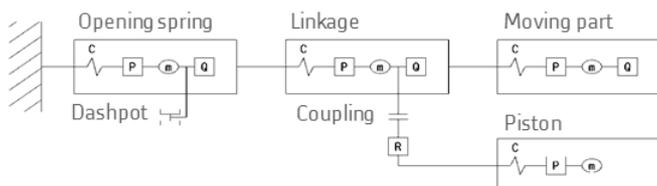
- Aktuellste Evolutionsstufe der FK Federspeicherantriebe
- 200'000 Antriebe weltweit installiert
- Wartungsfrei bis 10'000 Schaltungen
- Extrem schneller Bewegungsverlauf, erlaubt AUS-Schaltungen mit 2-Zyklusbedingung bei 50 und 60 Hz



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter--P 16
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

Simulations Tools Makroskopisch «CIBRES»

Equivalentes mechanisches Abbild

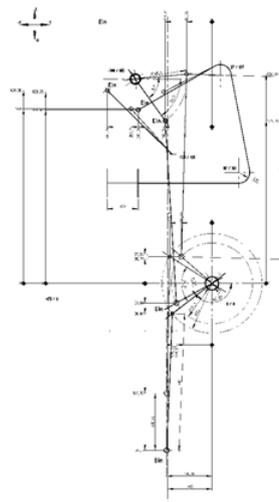


C = Federkonstante

m = Masse

P = Übersetzungsverhältnis innerhalb des Elementes

Q = Übersetzungsverhältnis zum nächsten Element der Kette



- **Komplette Modellierung der Lichtbogenphysik**
- **Programm wurde vor über 35 Jahren in Fortran programmiert und über die Zeit in diverse neuere Programmiersprachen portiert**

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter - P 17

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

Simulations Tools Makroskopisch «CIBRES»

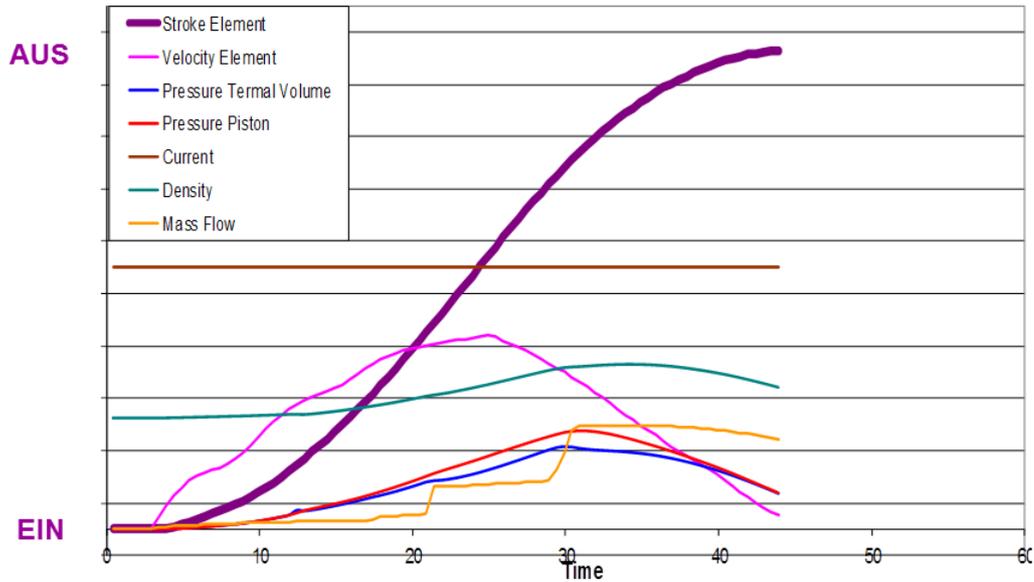
INPUT	OUTPUT
<ul style="list-style-type: none"> • Geometry of the cinematic chain <ul style="list-style-type: none"> • Relation of the strokes of each of the sectors • Masses • Spring constants of the sector • Force and spring constants to operate the equipment • Geometry of the breaking chamber <ul style="list-style-type: none"> • Contact and nozzle dimensions to determine the opening sections in relation to the stroke. • Piston dimensions • Voluminas • Electrical data input <ul style="list-style-type: none"> • Breaking current • Frequency • Asymmetry • Time constant • Arcing time • Gas parameters (SF6) 	<ul style="list-style-type: none"> • CB Element stroke, speed, acceleration • Pressure in compression- and thermal-volumes • Mass flow, density (gas)

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter - P 18

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

Simulations Tools Makroskopisch «CIBRES»

Ausschaltung : "no – load"



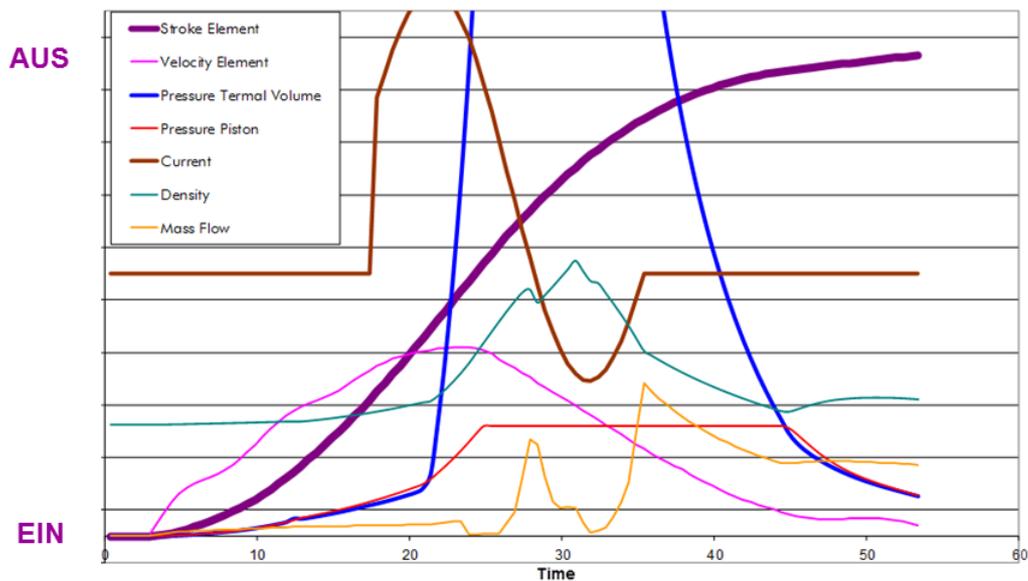
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 19

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



Simulations Tools Makroskopisch «CIBRES»

Ausschaltung : T100a, tar=18ms



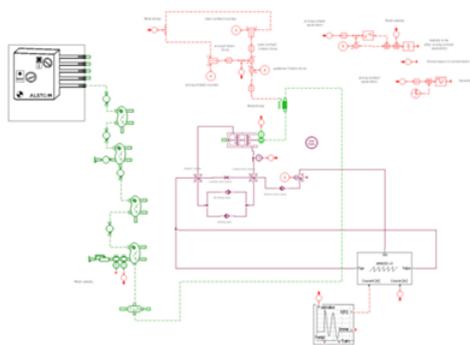
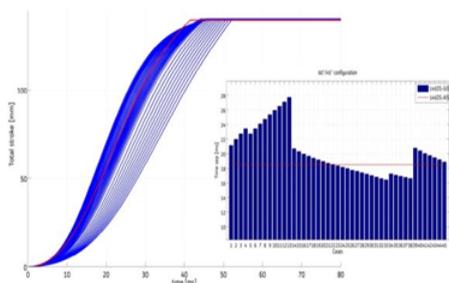
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 20

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



Simulations Tools Makroskopisch «AMESIM / AMESIS»

- Moderne grafische Benutzeroberfläche
- Funktionsblöcke lassen sich individuell erstellen und anpassen
- Bibliotheken mit vordefinierten Federspeicherantriebstypen, Leistungsschalter, etc.
- Gasbibliothek: SF6, CF4, N2, CO2, C_2F_6 , etc.
- Mechanischer und elektrischer Detaillierungsgrad sehr hoch
- Verschieden Parametersets lassen sich effizient durchrechnen



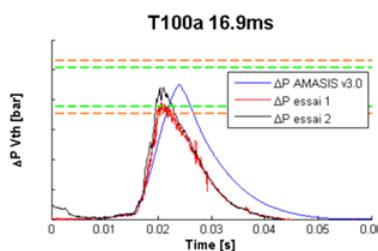
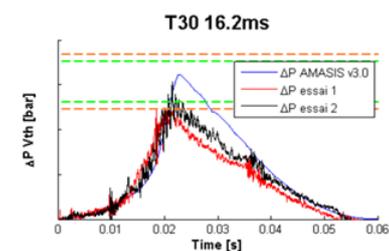
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 21

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

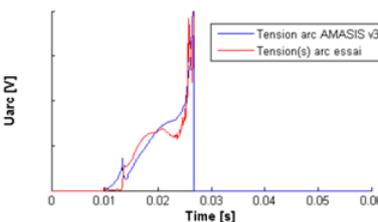
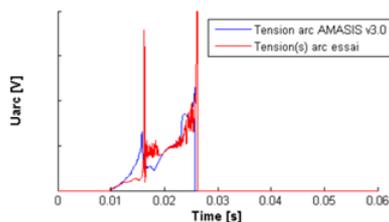


Simulations Tools Makroskopisch «AMESIM / AMESIS»

Vergleich der Simulationen mit gemessenen Werten aus Leistungsschaltversuchen



Druckaufbau im
Leistungsschalter
(Thermisches Volumen)



Lichtbogenspannung
während des
Schaltvorganges

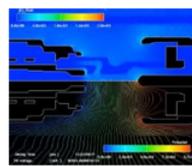
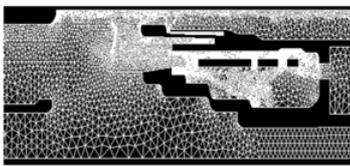
420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 22

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

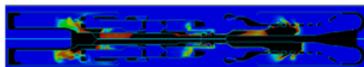


Simulations Tools Mikroskopisch «MC3»

- Komplette Simulation des Ausschaltvorganges
- Sehr rechenintensive Simulationen
- Auswertung von
 - Elektrische Feldverteilung
 - Gasströmungen, Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, Dichte



Video Feldverteilung
cap. switching



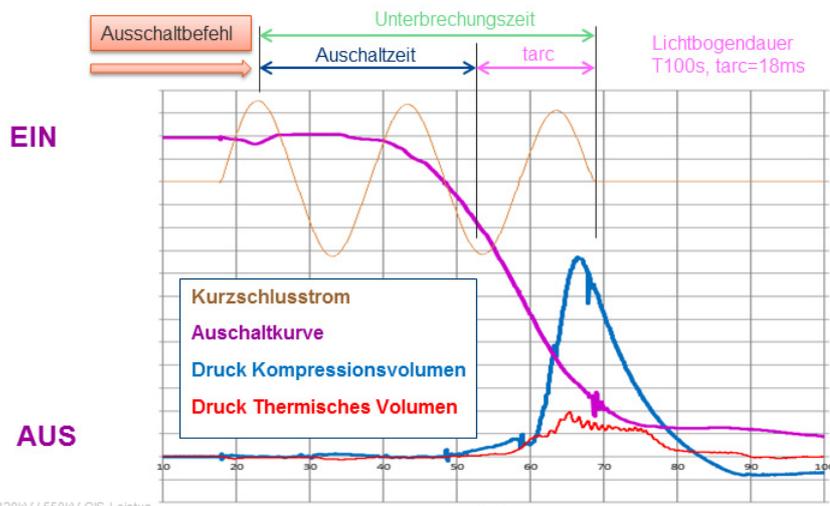
Video Leistungsschaltversuch

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 23

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

Prüfungen in Labor

- Schlussendlich wird jedes Schaltgerät im Laufe des Entwicklungszyklus im Labor mit den verschiedenen Lastfällen überprüft
- Die Simulationen werden anhand von realen Messungen verifiziert und die Modelle bei Abweichungen allenfalls angepasst oder weiter verfeinert



420kV / 550kV GIS Leistun

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

Prüfungen in Labor

Alle relevanten Prüfungen werden in Versuchslabors durchgeführt:

- Klemmenkurzschluss
 - T100s, T60, T30, T10 symmetrischer Kurzschluss
 - T100a asymmetrischer Kurzschluss
- Abstandskurzschluss (Linie)
 - L90, L75, L60
- Schalten in Phasenopposition
 - OP1, OP2
- Kapazitive Schaltfälle
 - Line charging and cable charging current
 - Capacitor bank current switching tests (Back to Back)
- Einfacher und doppelter Erdschluss
 - SEF, DEF

Spezifische Schaltfälle (Optionale Prüfungen)

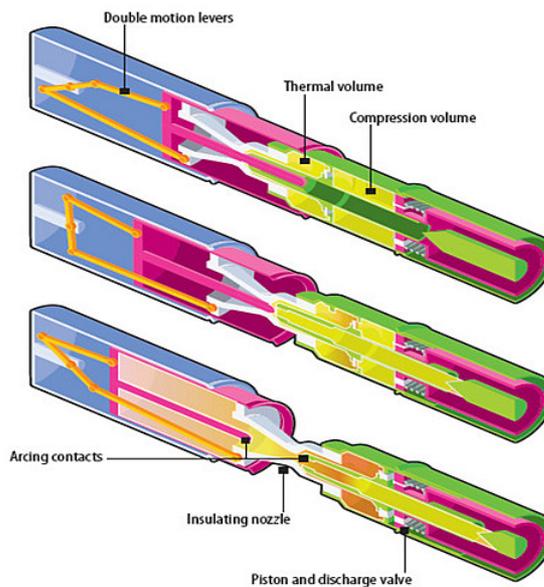
- Small inductive currents "Reaktorschalten"
- Synchronized switching (Interessant für Trafos, Kondensator-Bänke, Reaktoren, Freileitungen)
- Transformer Limited Fault

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 25
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



Ausblick

- 550kV - 63kA
- Einfachunterbrecher
- Double-motion
- Federspeicherantrieb



420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 26
© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.



Ausblick

- 800kV /1100kV single break ?
- SF6 freie Schaltanlagen basierend auf g3, inklusive Unterbrecher, Ur = 145kV
 - Erweiterung des Produkt-Portfolios . . .

GIS 145 kV, 40 kA, -25°C



g³ Trademark application owned by Alstom Grid SAS

420kV / 550kV GIS Leistungsschalter- P 27

© ALSTOM 2013. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty, legal or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use, or disclosure to third parties, without express written authority, is strictly prohibited.

ALSTOM



www.alstom.com

ALSTOM
Shaping the future

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

SF6-freie Hochspannungsleistungsschalter

Dr. Walter Halaus
ABB Schweiz AG, Zürich

Funktion und beruflicher Werdegang

Walter HOLAUS wurde 1972 in Österreich geboren. Er graduierte als Diplomingenieur in Elektrotechnik an der TU Wien 1997 und promovierte 2001 an der ETH Zürich zum Thema „Ultra-schnelle Schalter“. Seit 2002 ist er bei ABB Schweiz im Bereich Hochspannungstechnik: Er war Projektleiter, Teamleiter und Entwicklungsleiter für Gas-Isolierte Schaltanlagen (GIS) und schliesslich verantwortlich für das globale Entwicklungsprogramm für Hochspannungs-GIS. Er hält Patente zu den Themen „Strombegrenzer“, „GIS“ und „Schalter“.

Seit 2014 ist er Globaler Produktmanager für Hochspannungs-Schaltkammern und Antriebe bei ABB.

SF6-freie Hochspannungsleistungsschalter

Walter Halaus
ABB Schweiz AG, Zürich

1. Kurzfassung

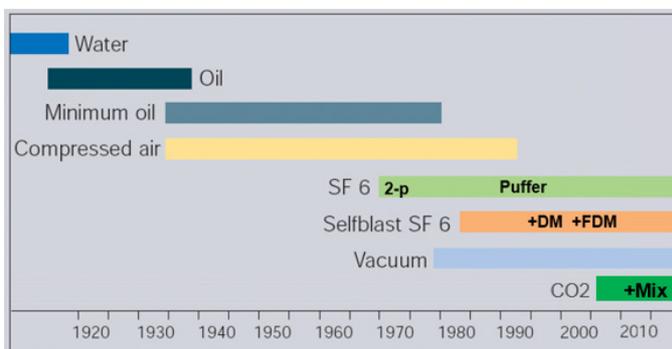
Dieses Referat gibt eine Übersicht über Entwicklung und Stand von SF6-freien Hochspannungs-Leistungsschaltern von 72kV bis 245 kV bei ABB.

Alternative Gase, Schalterdesign, Ratings, Applikationen, Pilotinstallationen

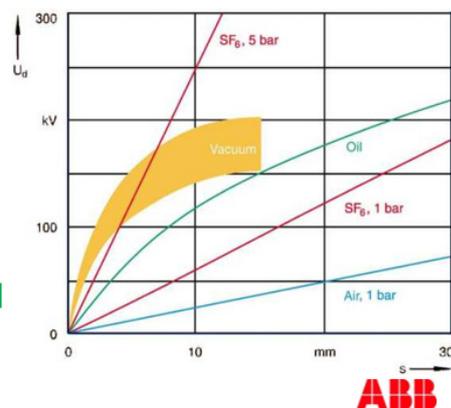
2. Folien zum Inhalt

Technologien für Hochspannungs-Leistungsschalter Evolution der Schaltmedien

- Leistungsschalter haben historisch schon viele Schaltmedien verwendet
 - Bis etwa 1960 waren alle "SF6 frei"
 - In der Mittelspannung dominiert heute Vakuum als SF6 Alternative
 - In Hochspannungs-Anwendungen dominiert heute SF6 als Schaltmedium
 - Seit 2010: Schalter mit CO2 und Gasgemischen als Nischenprodukte



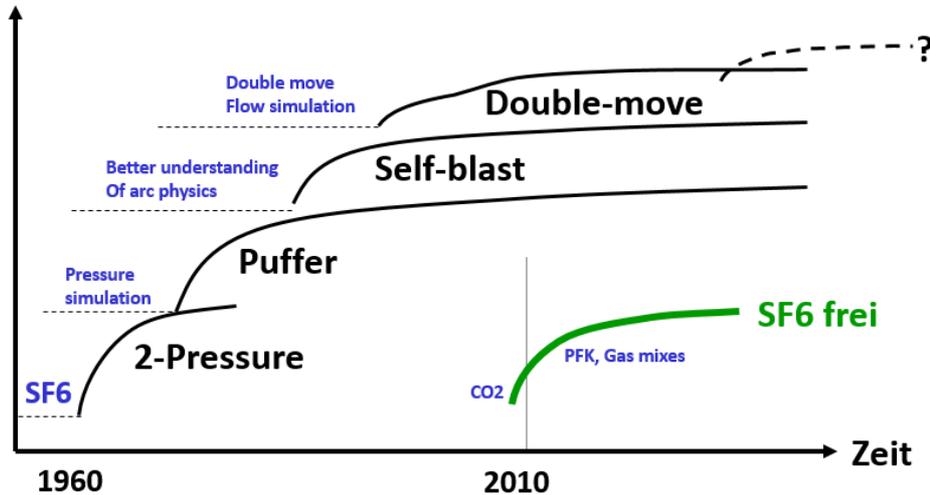
© ABB Group
30. Oktober 2015 | Slide 2



ABB

Evolution der Schaltkammertechnologien Technologiesprünge und Performance/Kosten

Performance / Kosten



Ähnliche (meist zeitverschobene) Entwicklung bei allen HV Schaltgeräteherstellern.

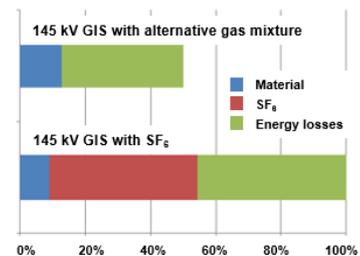
© ABB Group
October 30, 2015 | Slide 3



SF6 Ersatz in HV Leistungsschaltern Treiber für Entwicklung

- Steigendes Umweltbewusstsein. „Grüne“ Lösungen
- Zunehmende Vorschriften in Bezug auf den Klimawandel (z. B. Reduzierung von CO₂-Emissionen)
- Meldepflicht und Besteuerung von SF₆ in bestimmten Ländern
- „Energiewende“ in Europa (erneuerbare Energien)
- Einhaltung bestehender oder potenzieller künftiger SF₆-Richtlinien oder -Verbote
- Verfügbarkeit von SF₆-Alternativen
- CO₂-Bilanz um bis zu 50% über die Lebensdauer einer GIS verbessert
- Geringere Lebenszykluskosten, da (gegebenen-falls) keine SF₆-Abgaben zu tragen sind
- Vermeidung von SF₆ Inventarlisten

Beispiel: Lebenszyklusanalyse für Global Warming Potential (GWP) einer GIS

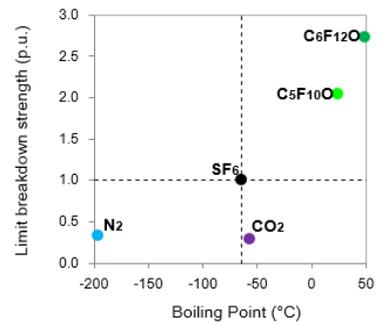


- Gemäss ISO 14040 berücksichtigt diese Analyse drei wichtige Faktoren:
 - Materialien
 - Isoliergasleckagen
 - Stromverluste (bei 50% des Nennstroms über 30 Jahre)
- Rahmenbedingungen:
 - Ausrüstungsnutzung: 30 Jahre
 - Angenommene Gasleckrate: 0,1% pro Jahr, kum. 30 Jahre, 1% Verlust Handhabung, 1% Verlust Außerbetriebnahme

Technische Verbesserung und Leistungserhöhung ist kein Grund für SF₆ Ersatz.
Die Performance von SF₆-Schaltern kann ohne SF₆ nicht erreicht werden.

Alternative Gase zu SF₆ Viele Kandidaten...

- **CO₂, O₂, N₂**: Bekannte Alternativen. Reduzierte Dielektrische Werte
- **Fluoroketone: e.g. C5 PFK**: perfluorinated ketone with 5 carbon atoms
 - 3M Produkt: Novec™ 5110. GWP: 1 CO₂ equivalent. Praktisch ungiftig. Dampfdruck: 44 kPa bei 5°C.
 - → Nur als Gasgemisch (Mit Luft, CO₂) geeignet
 - Gasgemisch +5°C hat etwas schlechtere Durchschlagsfeldstärke wie SF₆
 - Schalten und Lichtbogenlöschung: CO₂+PFK, +5°C gasgemisch hat vergleichbare Performance wie SF₆
 - Minimale Umgebungstemperatur neu als wichtigster Parameter !



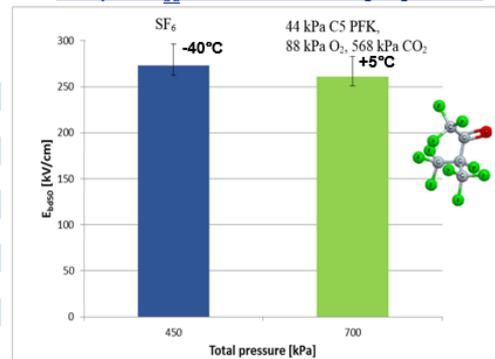
Relative to SF₆ limit breakdown strenght at 1 bar for single gas components [1]

Chemische Eigenschaften

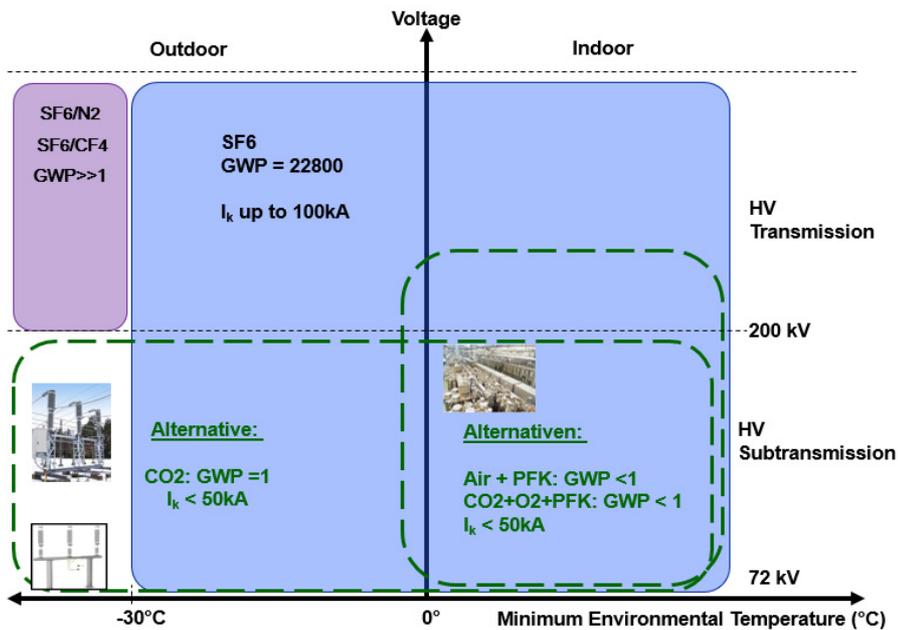
Property	Fluoroketone				SF ₆
	C4K	C5K	C6K	C7K	
Molecular Weight	<200*	266	316	366	146
Boiling Point (°C)	~0*	24.2	49.2	74	-63.9
Thermal stability (°C)	>600	~600	~600	<600	>1800
Flammability (vol%)	unknown	none	none	none	none
Chemical stability		metastable state			stable
Atmospheric Lifetime (yrs)	<.02	<0.02	0.014	<0.02	3200
Global Warming Potential	>1	~1	1	1	23,900
Ozone Depletion Potential	0	0	0	0	0
Toxicity - LC50 4hr. (ppmv)	<1000	>20,000	>100,000	>100,000	>100,000

* estimated values

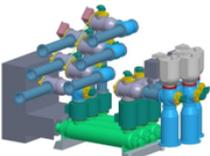
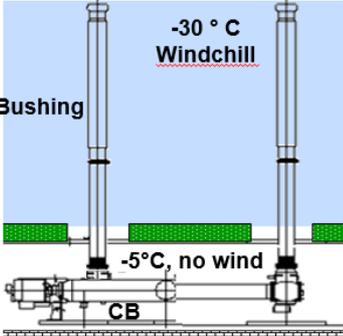
Beispiel: E_{bd} von SF₆ vs. PFK gasgemisch



SF₆ und alternative Gase für HV CB Einsatzbereiche



SF6 freie Hochspannungsprodukte Anwendbarkeit abhängig von Umgebungstemperatur

GIS	Hybrid	PASS	DTB	LTB
				
Naturally indoor Some outdoor	Outdoor ≤ -30° C	Outdoor ≤ -30° C	Outdoor ≤ -30° C	Outdoor ≤ -30° C
Optionen für SF6 Alternative				
PFK Gasgemische	CO2	CO2	CO2	CO2
↓		Option: Breaker underground		↓
Pilot: 170kV, 40kA, +5°C, 				Pilot: 145kV, 31.5kA, -50°C 

SF6 freie GIS 170kV, 40kA Pilot installation bei EWZ in Zürich



- 170 kV, 1250 A, 40 kA, + 5°C, Indoor, based on ELK-14 245 kV.
- Min functional pressure: 39 kPa C5 PFK+Trärgas, total 700 kPa
- Supply power for a district in the city of Zurich. All cable connections.
- Lieferung 01/2015, Inbetriebnahme und Übergabe am 16.06.2015.
 - Als Teil einer künstlerischen Installation mit Sichtfenster zur Strasse.
- Ziel: Langzeit-Betriebserfahrung für diese Technologie sammeln.



SF6 freier Freiluftschalter 145 kV, 31.5 kA CO2 Schalter für Tieftemperaturanwendung



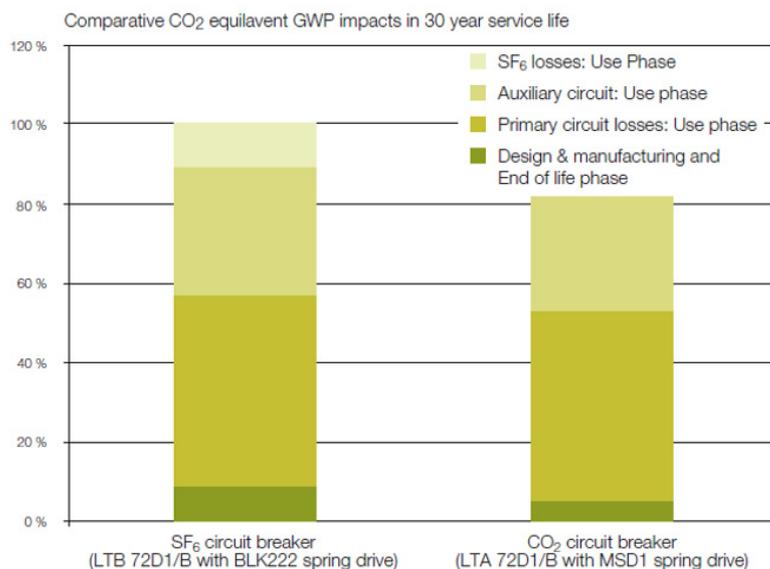
- Freiluftschalter Produkt:
 - 72.5/84 kV, 31.5kA, -50°C, LTB+DCB, CO2
- Freiluftschalter: Pilotinstallation CO2
 - Seit 2010 in SE in einer Anwendung für Kondensatorbankschalten: tägliche Schaltungen
 - Ratings:

Main characteristics	
Rated voltage	145 kV
Rated frequency	50 Hz
Rated short-circuit current	31.5 kA
Capacitive switching factor	1.4
Rated current	3150 A
Ambient temperature	-50 °C
Tested according to IEC 62271-100	



Lowering environmental impact over life-cycle 18 % less

Each new 72.5 kV LTA breaker has the potential to **reduce CO₂ equivalent emissions** by 10 tons, or **18 %**, through the product life cycle.



3 Schlussfolgerung

SF6 freie Hochspannungs-Leistungsschalter Zusammenfassung

- SF6 als Schaltmedium dominiert in Hochspannungs-Leistungsschaltern. Technologie wurde seit 1960 kontinuierlich weiterentwickelt und hat bestes Performance/Kosten Verhältnis.
- Gründe für SF6 Ersatz sind Umweltbewusstsein und Aufwände für SF6 als Klimagas. Es gibt Alternativen – aber keinen 1:1 Ersatz.
- ABB hat HV-Leistungsschalter mit CO2 und mit PFK Gasgemischen entwickelt
 - CO2 als Schaltmedium für Tieftemperaturanwendungen bis -50°C.
 - PFK Gasgemische für Innenraumanwendungen bis -5°C.
 - Ratings sind jeweils reduziert vs. SF6. Reduktion ist stärker bei CO2 ohne PFK.
- SF6 freie Pilotinstallationen sind in Betrieb
 - GIS, Innenraum, 170 kV, 1250 A, 40 kA, + 5°C, based on ELK-14/245
 - LTB, Freiluft, 145kV, 3150A, 31.5 kA, -50°C, based on LTB-E 245
 - Ziel: Langzeit-Betriebserfahrung sammeln.



FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Gesteuertes Schalten und Monitoring von Leistungsschaltern

Dr. Michael Stanek

ABB Schweiz AG, Hochspannungsprodukte, Zürich

Funktion und beruflicher Werdegang

Michael Stanek, geboren 1965 in Wien, studierte Elektrotechnik an der TU Wien und promovierte 2000 an der ETH Zürich. Seit 1998 ist er bei ABB als Entwicklungsingenieur tätig, vorwiegend in den Fachgebieten gesteuertes Schalten und Monitoring. Er war/ist Mitglied der CIGRÉ Arbeitsgruppen A3.07 (Controlled Switching) und A3.35 (Commissioning of Controlled Switching Systems).

Gesteuertes Schalten und Monitoring von Leistungsschaltern

Michael Stanek

ABB Schweiz AG, Hochspannungsprodukte, Zürich

1. Kurzfassung

Gesteuertes Schalten ist das Verfahren einen (Hochspannungs-)Leistungsschalter so anzusteuern, dass jede Phase zu einem bestimmten Phasenwinkel geschaltet wird, der optimal ist für den Schalter, die geschaltete Last oder das Netz. Es ist eine kostengünstige Lösung, um elektrische Schalttransienten zu minimieren. Optimale Transienten-Reduktion erfordert einen Leistungsschalter mit geringer Streuung und stabilen, vorhersagbaren elektrischen und mechanischen Eigenschaften, sowie ein geeignetes Synchronsteuergerät.

Monitoring ist hilfreich, um den Zustand von Betriebsmitteln zu kennen und daraus zustandsbasierte Wartungsstrategien abzuleiten. Es empfiehlt sich zielgerichteter Einsatz, z.B. um häufige Fehler abzufangen oder um kritische Komponenten zu überwachen. Bei Leistungsschaltern wird es häufig zur Auswertung von Schalthandlungen eingesetzt. Dies ist möglich auch ohne spezielle Sensoren durch Verwendung der Signale von den Hilfskontakten, die im Antrieb immer vorhanden sind.

Das Synchronsteuergerät führt standardmässig ein Monitoring der gesteuerten Schalthandlungen durch, um das Timing des Leistungsschalters zu optimieren. Daher liegt es nahe, die Monitoringfunktion zu erweitern, indem das Gerät zusätzlich die Umschaltzeitpunkte der Hilfskontakte erfasst. Der Zusatzaufwand für Sensorik, Messung und Auswertung ist gering. Dem gegenüber steht erhöhter Nutzen durch integrierte Überwachung des dynamischen Verhaltens des Leistungsschalters, sowie durch vereinfachte Auswertung der gesteuerten Schalthandlungen. Ggf. lässt sich dadurch sogar ein separates Monitoring-System für den Leistungsschalter einsparen.

2. Referatsfolien



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 1

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

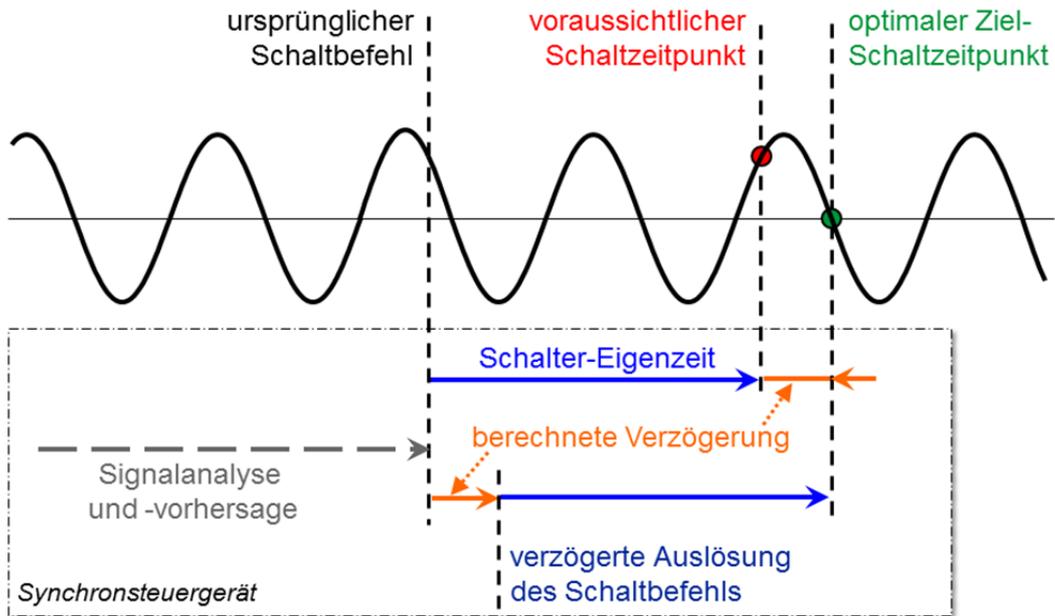
Inhalt

- Einführung
- Gesteuertes Schalten
 - Grundlagen
 - Anwendungen
- Leistungsschalter-Monitoring
- Kombination gesteuertes Schalten und Monitoring
- Schlussfolgerungen

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 2

ABB

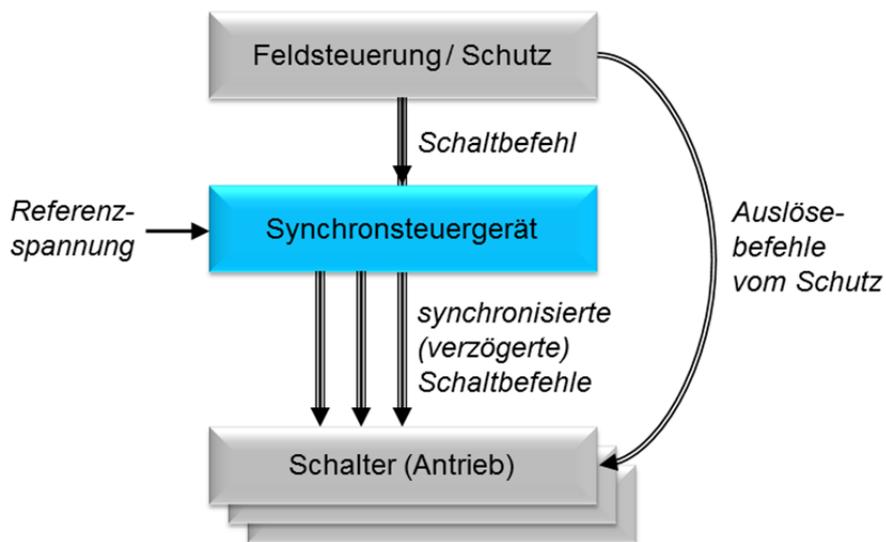
Gesteuertes Schalten: Funktionsprinzip Einphasige Darstellung



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 3

ABB

Synchronsteuergerät Eingefügt in Steuerkreise des Leistungsschalters



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 4

ABB

Gesteuertes Schalten Überblick Anwendungen



Kondensator-
bank

Transienten
(Spannung,
Strom)
minimieren



Drossel

Wieder-
zündungen
vermeiden



Transformator

Einschalt-
ströme
reduzieren



Übertragungs-
leitung, Kabel

Über-
spannungen
minimieren

**Verbesserte Netzqualität
Längere Betriebsdauer**

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 5

ABB

Längere Betriebsdauer

Gesteuertes Schalten: Nutzen in Zahlen Fallbeispiele

Geringere Anschaffungskosten für Leistungsschalter

- Weglassen des Einschaltwiderstandes reduziert Kosten um 30...50%

Geringere Anschaffungskosten für andere Hochspannungsapparate

- Verringerte Turmabmessungen für 320 km / 500 kV Freileitung (Kanada) reduzieren Materialkosten um 1.5 MUSD

Vermeiden betrieblicher Probleme auf Grund von Schalttransienten

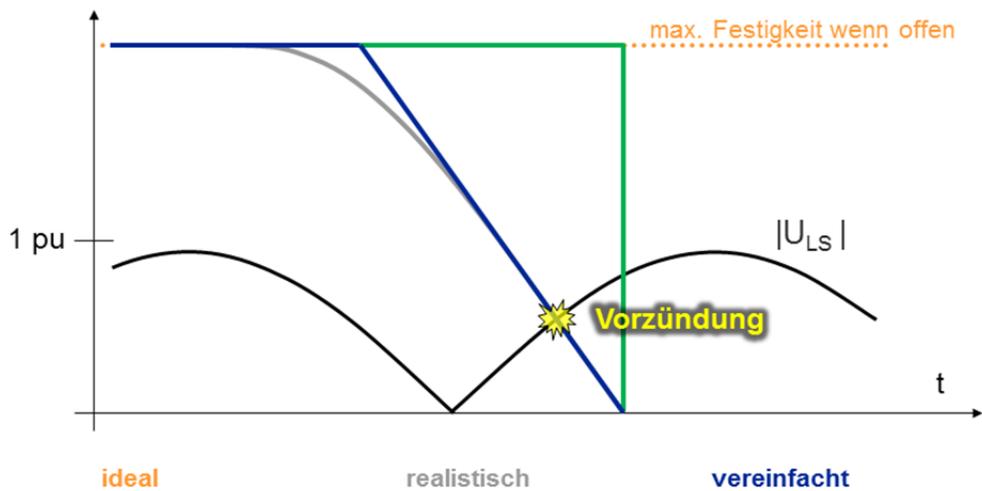
- Stahlwerk (Finnland) spart jährlich 100 kUSD ein, weil Produktion beim Einschalten des Schmelztrafos nicht zurückgefahren werden muss
- Ö raffinerie verlor mehrere MUSD auf Grund einer Schutzabschaltung verursacht durch ungesteuerte Einschaltung einer Kondensatorbank

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 6

Quelle: Stanek et al, "Experiences with Improving Power Quality by Controlled Switching", CIGRE 2000, paper 13/14/36-01

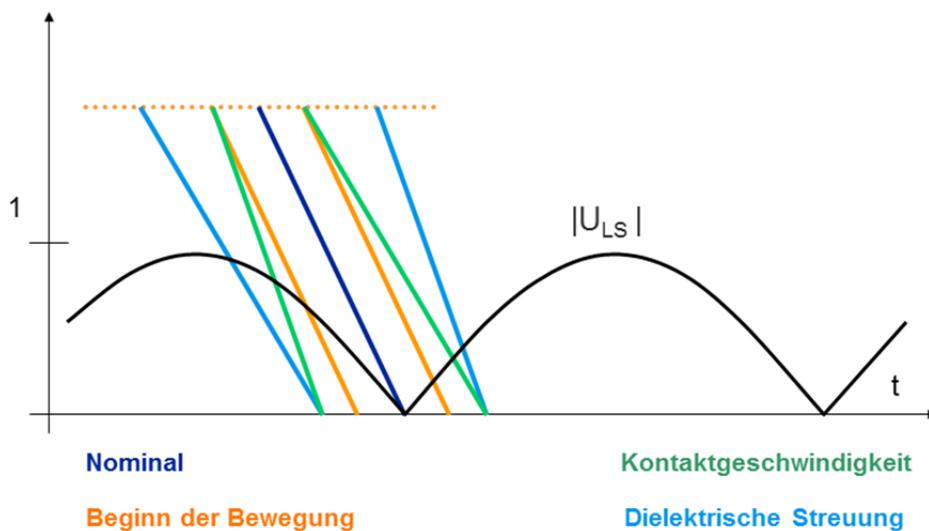
ABB

Eigenschaften des Leistungsschalters Dielektrische Einschaltcharakteristik

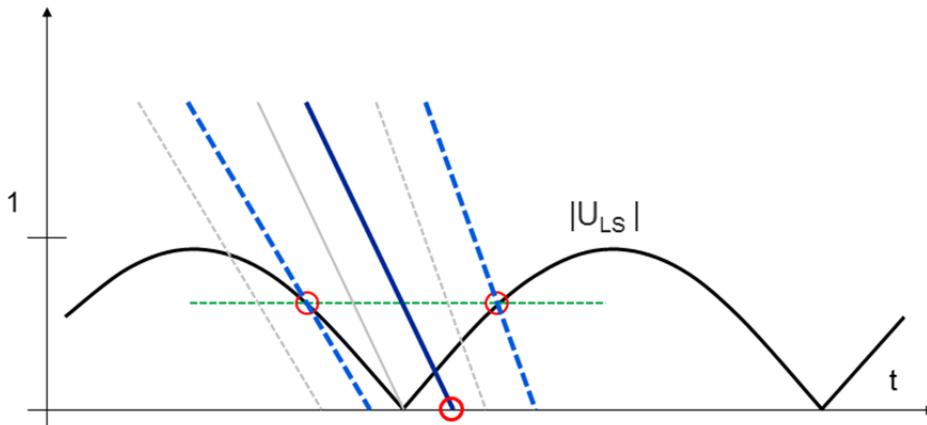


Steilheit am Ende der Bewegung = RDDS [kV/ms]
(Rate of Decrease of Dielectric Strength)

Eigenschaften des Leistungsschalters Kombination externer Einflüsse auf Einschaltcharakteristik



Eigenschaften des Leistungsschalters Auswahl des optimalen Einschaltzeitpunkts



Ziel: maximale Vorzündspannung minimieren

Zielzeitpunkt für Kontaktberührung hinter Spannungsnul gewählt

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 9

ABB

Optimierung der Genauigkeit Erfolgreiches gesteuertes Schalten unter allen Bedingungen

Anforderungen der Anwendung

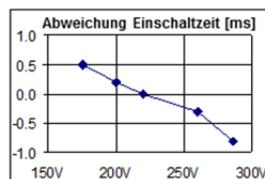
Genauigkeit des mechanischen Schaltzeitpunkts:
±1 ms

- Empfehlung CIGRÉ
- Leistungsschalter (+ Steuergerät)

Bekannte Streuung der RDDS

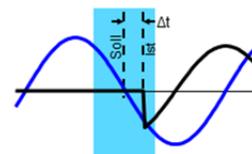
Kompensation externer Einflussgrößen

Steuerspannung der Schalterspulen
Antriebstemperatur
Stillstandszeit
gespeicherte Antriebsenergie
sonstige (z.B. Gasdichte)



Adaptive Korrektur der Schaltzeiten

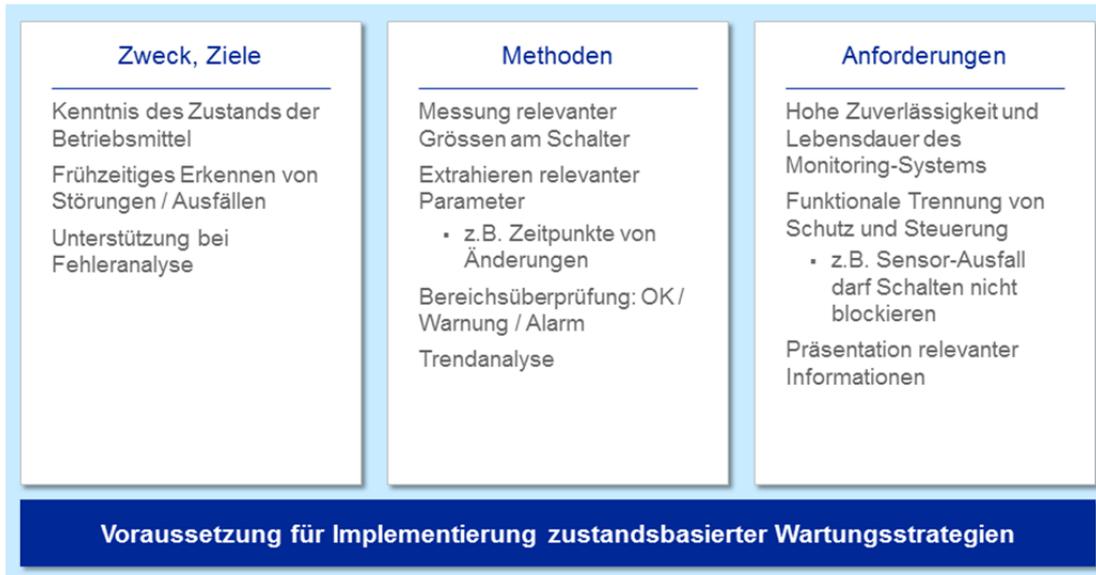
basierend auf gemessenen Schaltzeitpunkten
Kompensation systematischer Änderungen (Alterung)
Erkennung und Verminderung von Wieder-/Rückzündungen



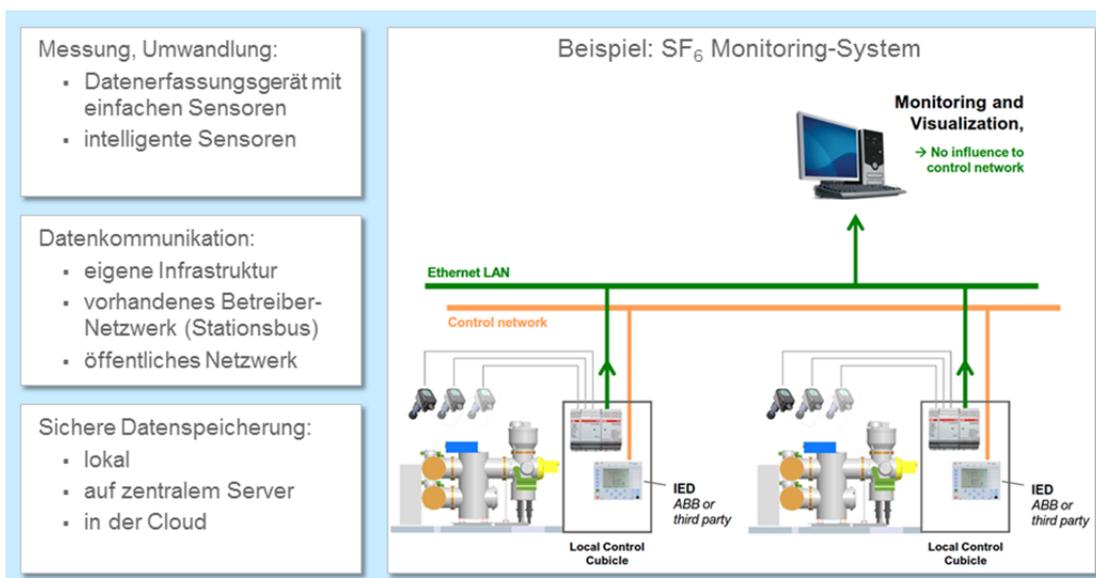
© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 10

ABB

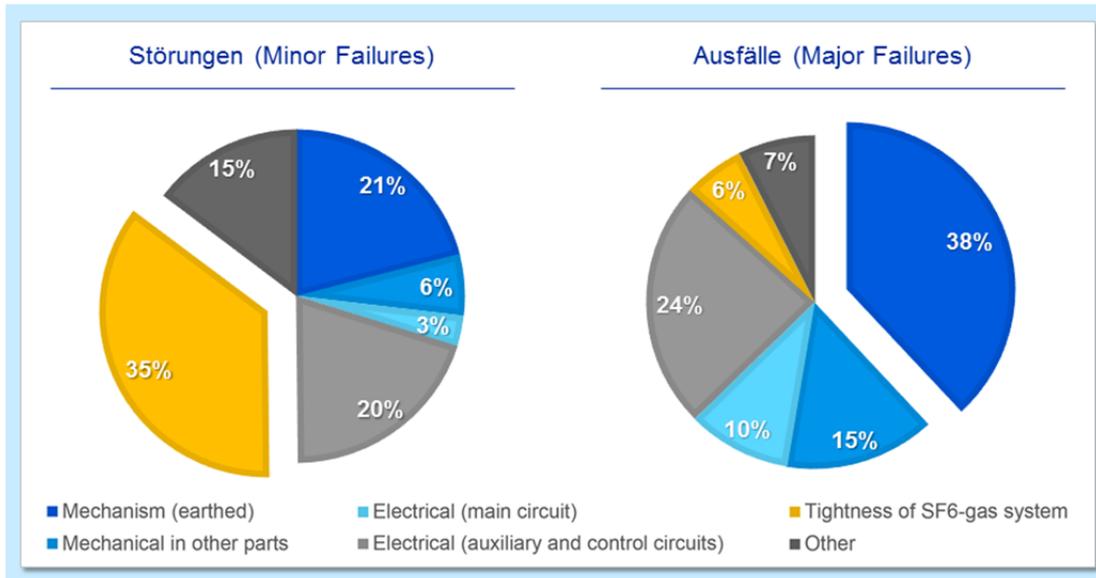
Leistungsschalter-Monitoring Allgemeines



Datenerfassung, Speicherung und Kommunikation Optionen für Systemarchitektur



Fehlerquellen in Leistungsschaltern Untersuchung: CIGRE WG A3.06 (2004-2007)



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 13

Quelle: "Reliability of High Voltage SF6 Circuit Breakers", CIGRE Technical Brochure 510, Oktober 2012, Kap. 2.7.7



Was überwachen? (1) SF₆ Gassystem

Relevante Größen

- Gasfüllung im Sollbereich (Dichtewächter)
- Gasdichte / Gasdruck (temperaturkompensiert)
- Leckrate
- Zeit bis Erreichen der Alarmschwelle

The screenshot shows the 'Gas Compartment B203' monitoring page. It displays sensor status (Gas sensor ok), pressure (585 kPa), density (37.71 g/l), and leakage rate (0.0 % per year). A history chart shows SF6 pressure over time, with a legend for SF6 pressure 20°C, nominal value, and alarm limits. The interface includes navigation controls and a 'Download chart data as CSV' option.

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 14



Was überwachen? (2)

Antrieb, elektrische Hilfs- und Steuerkreise

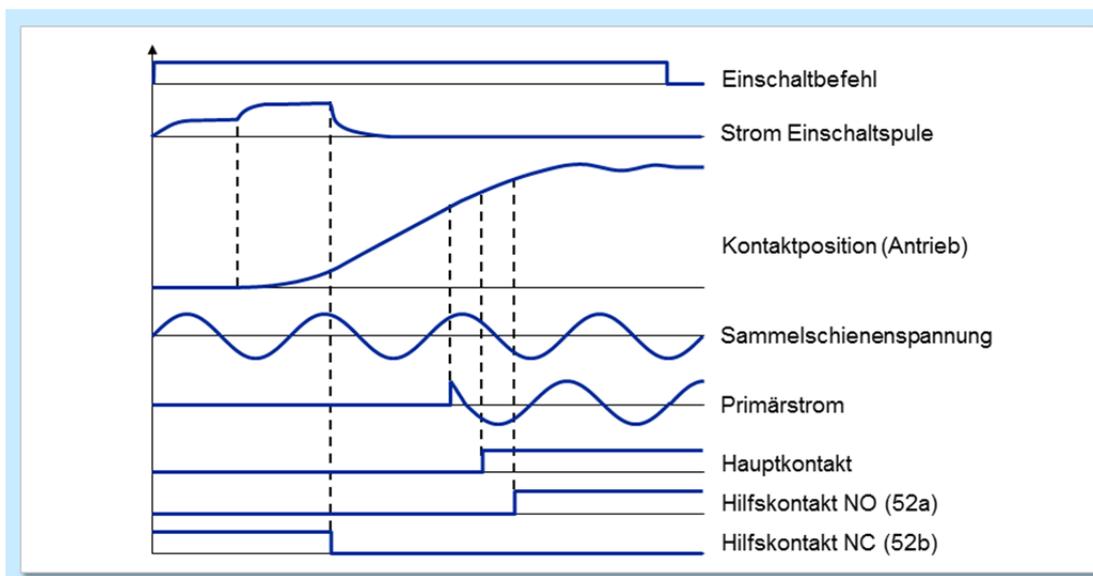
Kontinuierlich / sporadisch	Dynamisch (Schalthandlungen)
<p>Energiespeicher</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Füllstand ▪ Dauer und Häufigkeit des Aufladens ▪ Motorstrom <p>Spulenkreise</p> <p>Temperatur</p> <p>Heizungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Steuerung (Thermostat) ▪ Heizungskreise / Strom 	<p>Schaltzeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ gesamte Dauer ▪ einzelne Bereiche <p>Spulenstrom</p> <p>Bewegungskurve</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geschwindigkeit ▪ Gesamthub / Überlauf <p>Abgeschalteter Strom → Kontaktbrand</p>

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 15

ABB

Auswertung eines Einschaltvorgangs

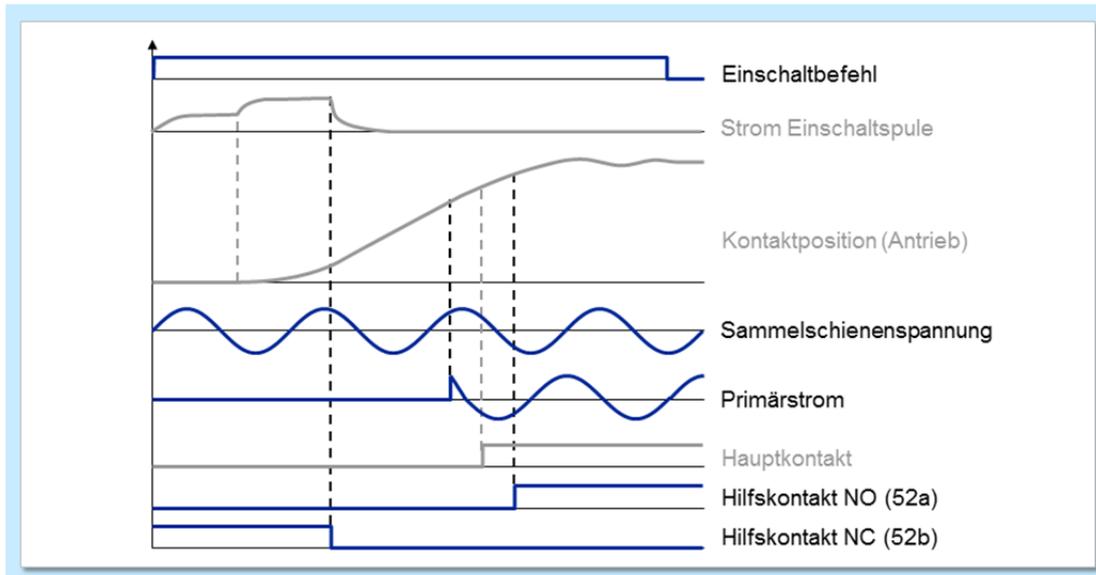
Üblicherweise gemessene Signale / Ereigniszeiten pro Phase



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 16

ABB

Auswertung eines Einschaltvorgangs Signale erfassbar ohne spezielle Sensoren am Schalter



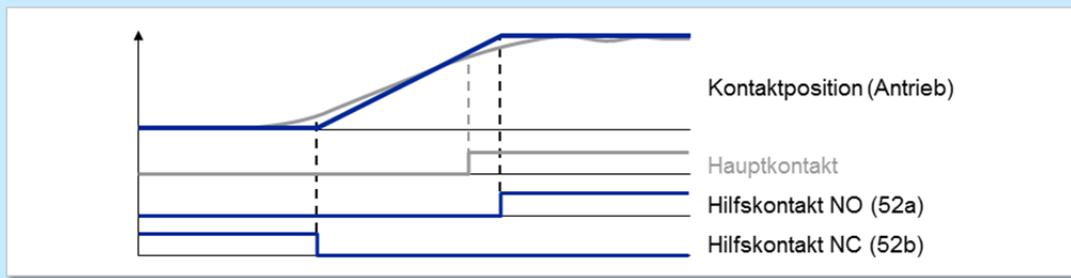
© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 17

ABB

Auswertung eines Einschaltvorgangs Einfache Nachbildung der Bewegungskurve

Umschaltzeitpunkte der Hilfskontakte geben Aufschluss über

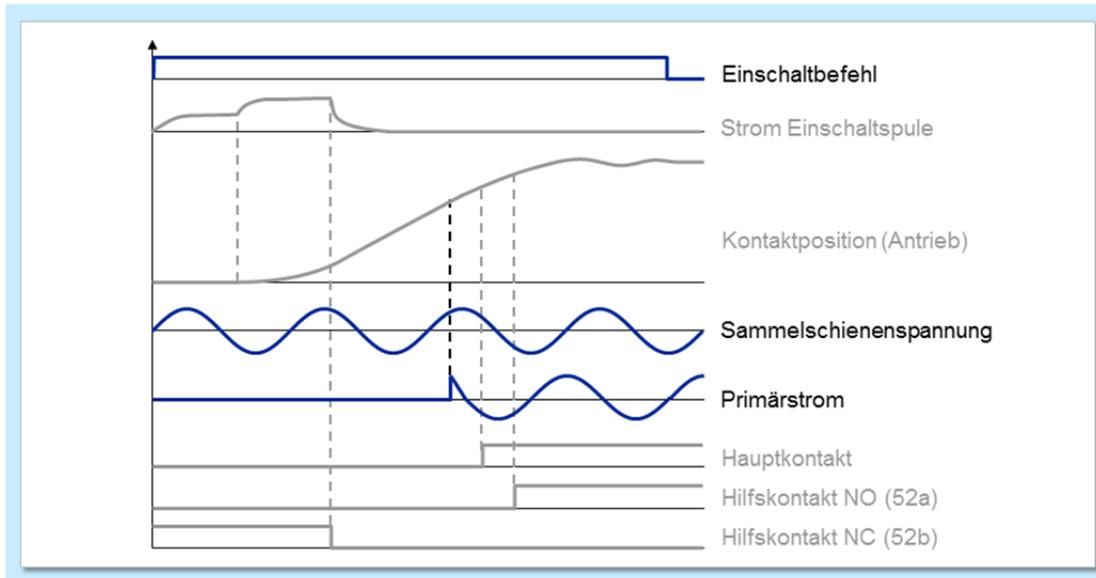
- Loslauf-Verzögerung
- Dauer der Kontaktbewegung
- Zeitpunkt der mechanischen Berührung / Trennung der Hauptkontakte



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 18

ABB

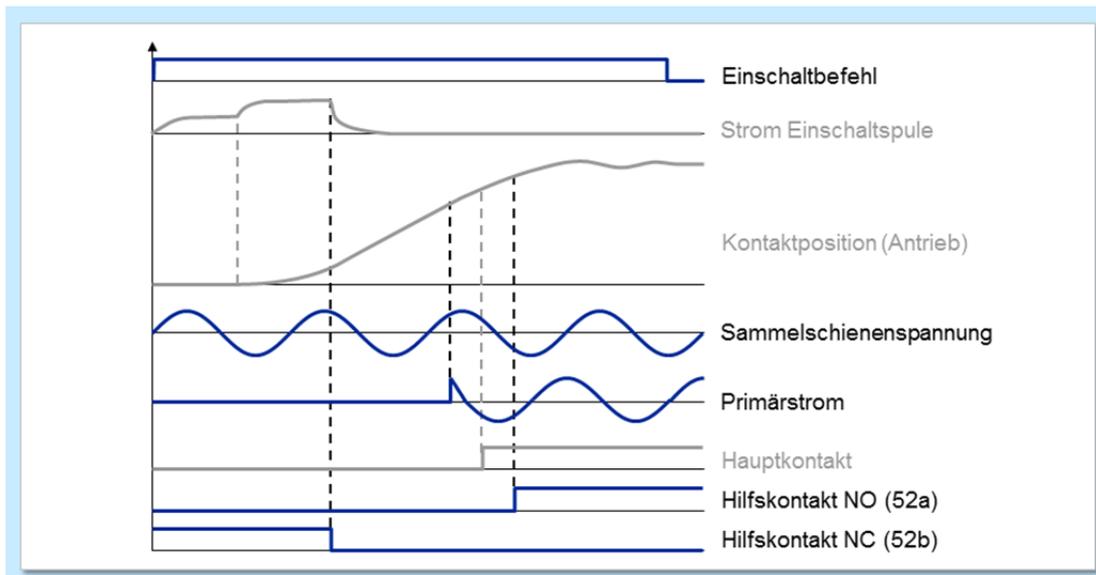
Auswertung eines gesteuerten Einschaltvorgangs Essenzielle Signalerfassung



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 19

ABB

Auswertung eines gesteuerten Einschaltvorgangs Erweiterte Signalerfassung ohne spezielle Sensoren



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 20

ABB

Empfehlung Gesteuertes Schalten kombiniert mit Schalter-Monitoring

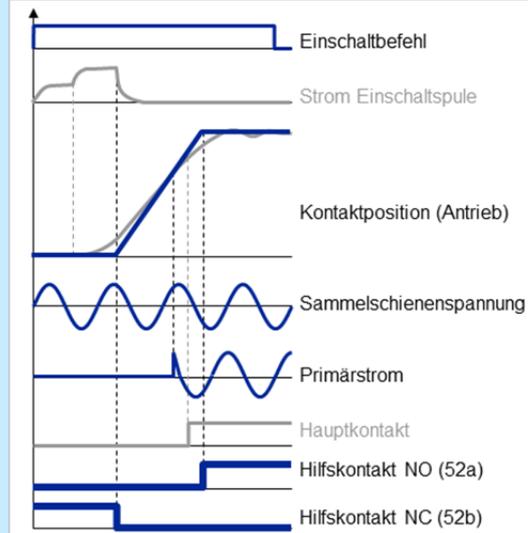
Bei jeder gesteuerten Schalthandlung (Ein oder Aus) zeichnet Synchronsteuergerät Signale auf:

- Primärspannung (Referenz)
- Primärstrom
- Hilfskontakte NO (52a) und NC (52b)

Automatische Auswertung des Schaltvorgangs, elektrisch und mechanisch

Praktische Aspekte

- Genauigkeit der Hilfskontakte: ± 0.3 ms
- Erfassungsgenauigkeit ± 0.1 ms
- Entladen der Kapazität von langen Steuerkabeln (hochohmige Binäreingänge)



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 21

Siehe: M. Stanek: "Analysis of Circuit Breaker Controlled Switching Operations – from Manual to Automatic."
UPEC 2015 Conference, Staffordshire University, Stoke-on-Trent, England, September 1-4, 2015.



Implementierung in Synchronsteuergerät Gemessene und berechnete Daten vergangener Schaltungen

ABB Switchsync™ PWC600 Demo Bay
2015-05-07 11:39

Home Lists Trend Reports User Logout

PWC600 > Operation records

Operation records | Waveform records | Events | Alarms | Internal events

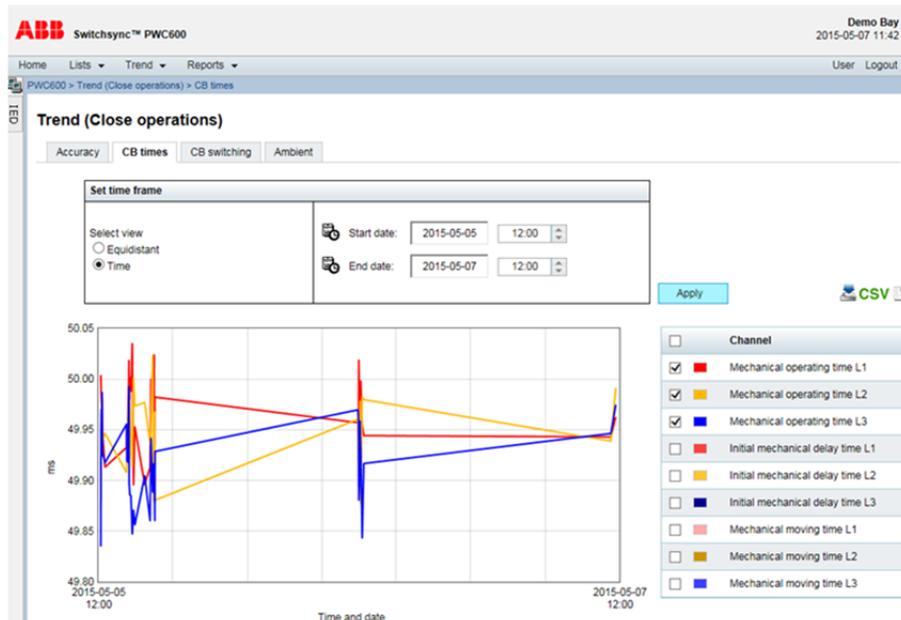
Latest | Select page: 1 of 4 | Submit | Close | Open | Fingerprint records | CSV

Date	Time	Op.	Electrical Target Error (ms)			Description	Value			Unit
			L1	L2	L3		L1	L2	L3	
2015-05-07	11:39:03.817000	C	0.36	0.42	0.51	Electrical target error	0.36	0.42	0.51	ms
2015-05-07	11:15:59.697000	O	-0.34	-0.24	-0.17	Electrical operating time	47.67	47.69	47.72	ms
2015-05-07	11:11:50.583000	C	0.43	0.27	0.33	Predicted electrical operating time	47.31	47.27	47.21	ms
2015-05-06	12:27:49.759000	O	-0.16	-0.32	-0.24	Current making angle	93.01	94.01	95.77	deg
2015-05-06	12:26:52.956000	C	0.47	0.53	0.38	Target current making angle	86.50	86.50	86.50	deg
2015-05-06	12:21:52.221000	O	-0.12	-0.30	-0.20	Arcing time	0.00	0.00	0.00	ms
2015-05-06	12:18:06.101000	C	0.38	0.48	0.32	Target arcing time	0.00	0.00	0.00	ms
2015-05-06	12:11:05.912000	O	-0.25	-0.16	-0.33	Mechanical target error	-1.41	-1.34	-1.29	ms
2015-05-06	12:10:13.363000	C	0.92	0.76	0.82	Mechanical operating time	49.96	49.99	49.97	ms
2015-05-06	12:08:05.106000	O	-0.33	-0.23	-0.15	Predicted mechanical operating time	51.37	51.33	51.26	ms
2015-05-06	12:07:29.114000	C	1.77	1.87	1.96	Initial mechanical delay time	20.04	20.05	20.04	ms
2015-05-06	12:06:51.194000	O	-0.28	-0.18	-0.36	Mechanical moving time	35.18	35.21	35.19	ms
2015-05-06	12:05:27.366000	C	0.47	0.31	0.16	Primary contact velocity	4.55	4.54	4.55	m/s
2015-05-06	12:03:18.664000	O	-0.17	-0.10	-0.25	Controller delay time	48.94	48.94	48.94	ms
2015-05-06	12:02:24.071000	C	0.30	0.36	0.46	Idle time	0.38	0.38	0.38	h
2015-05-06	12:00:21.827000	O	-0.26	-0.18	-0.33	Spring charge	0.00	0.00	0.00	
2015-05-06	11:59:15.665000	C	0.25	0.35	0.41					
2015-05-06	11:57:56.403000	O	-0.24	-0.14	-0.32					

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 22



Implementierung in Synchronsteuergerät Graphische Trends der mechanischen Schliesszeiten des LS



© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 23

ABB

Schlussfolgerungen Gesteuertes Schalten und Monitoring

Gesteuertes Schalten ist kostengünstige Methode zur Reduktion von Schalttransienten im Netz.

Monitoring ist hilfreich, um den Zustand des Leistungsschalters zu kennen und daraus zustandsbasierte Wartungsstrategien abzuleiten.

- Bedarfsorientierter Einsatz: häufige Fehler, kritische Komponenten, usw.
- Auswertung von Schalthandlungen möglich ohne spezielle Sensoren, durch Verwendung der Signale von Hilfskontakten

Empfehlung: Erweiterung der standardmässigen Auswertung des gesteuerten Schaltens um Erfassung der Umschaltzeitpunkte der Hilfskontakte.

- Geringer Zusatzaufwand (Sensorik, Messung, Auswertung)
- Nutzen in Überwachung des dynamischen Verhalten des Leistungsschalters, und in vereinfachter Auswertung der gesteuerten Schalthandlungen
- Ggf. Einsparung eines separaten Monitoring-Systems

© ABB
19. Oktober 2015 | Folie 24

ABB

Power and productivity
for a better world™ 

3 Weiterführende Literatur

- [1] CIGRÉ Working Group A3.07: “Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application – Lines, Reactors, Capacitors, Transformers.” 1st part: ÉLECTRA, No. 183, April 1999, pp. 43-73. 2nd part: ÉLECTRA, No. 185, August 1999, pp. 37-57.
- [2] Michael Stanek: *Model-Aided Diagnosis for High Voltage Circuit Breakers*. Dissertation No. 13507, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2000.
- [3] M. Stanek, et al.: “Experiences with Improving Power Quality by Controlled Switching.” *CIGRE Session 2000*, paper No. 13/14/36-01.
- [4] CIGRÉ Working Group A3.06: *Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment: Part 2 - Reliability of High Voltage SF6 Circuit Breakers*. Technical Brochure No. 510, October 2012.
- [5] M. Stanek, U. Parikh, A. Parapurath, A. Talluri: “Advancement and Broadening of Controlled Switching Technology.” *Gridtech 2015, Conference 1: Latest Technologies in T & D, Renewable Energy Integration, Smart Grid, Energy Efficiency, Communication*. New Delhi, India, April 8-10, 2015.
- [6] Michael Stanek: “Analysis of Circuit Breaker Controlled Switching Operations – from Manual to Automatic.” *UPEC 2015 Conference*, Staffordshire University, Stoke-on-Trent, England, September 1-4, 2015.

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Zusammenspiel von Point-on-Wave Steuerung mit Low-Scattering Federspeicherantrieben für phasensynchrones Schalten

Dr. Michael. M. Walter

ALSTOM Grid GmbH, Oberentfelden

Funktion und beruflicher Werdegang

Seit 2013 **ALSTOM Grid AG** Head of High Voltage Technologie GIS (Leiter des Hochspannungslabors und einer Entwicklungsgruppe mit Themenschwerpunkt Simulation und Prüfung)

Seit 2015 **TK42 High-voltage and high-current test techniques**, aktives Mitglied

2010-2013 **ETH Zürich, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik von Prof. Dr. C. M. Franck**, Ph. D. Studium: Schaltlichtbögen in passiv resonanten HVDC Leistungsschalter

2009 **MITSUBISHI ELECTRIC Japan**, Masterarbeit: Einfluss von Öffnungswiderständen und Überspannungsableitern auf die TRV von UHV-Leistungsschaltern

2004-2009 **ETH Zürich: Bachelor und Master Studium**, Elektrotechnik und Informationstechnologie

Zusammenspiel von Point-on-Wave Steuerung mit Low-Scattering Federspeicherantrieben für phasensynchrones Schalten

Michael. M. Walter

ALSTOM Grid GmbH, Oberentfelden

1. Kurzfassung

Solange die Phasenlage der Vorzündung beim Zuschalten und die Lichtbogenbrenndauer beim Ausschalten Zufallsparameter sind, muss sowohl das Netz als auch der Schalter für den ungünstigsten Fall ausgelegt werden. Dies führt zwangsläufig zu einer Überdimensionierung der Komponenten. Ein präzise gewählter Schaltzeitpunkt der einzelnen Pole in Leistungsschaltern, relativ zum Phasenwinkel der Spannung und relativ zur Nachbarphase, kann zur Optimierung der Schaltleistung, zur Reduktion unerwünschter Rückwirkungen des Schaltvorgangs auf benachbarte Netzkomponenten und zur Erhöhung derer Lebenserwartung genutzt werden. Bei der systematischen Anwendung des phasensynchronen Schaltens reduzieren sich die Überspannungs- und Überstromanforderungen für den Leistungsschalter und die benachbarten Netzkomponenten. So kann man zum Beispiel bei höheren Spannungsebenen auf die Einschaltwiderstände im Leistungsschalter für lange Freileitungen verzichten.

Im Beitrag wird für die Schalfälle Einschalten leerlaufender Leitungen und Ausschalten induktiver Lasten das Zusammenspiel zwischen Schaltkammer, Schalterantrieb und Synchronsteuergerät aufgezeigt. Ausgehend von der Rate-of-Decay of Dielectric Strength (RDDS) und Rate-of-Rise of Dielectric Strength (RRDS) werden die Anforderungen an Wiederholgenauigkeit und Schaltgeschwindigkeit aufgezeigt. Es wird aufgezeigt, wie sich die Einflussparameter Vorzündverhalten, Stromabriss, Schaltfall, Schaltertemperatur, Auslösespannung, mechanische Alterung und Stehzeit auf die Schaltzeit auswirken und wie deren Einfluss mittels Synchronsteuergerät kompensiert werden kann.

2. Schaltfall zuschalten leerlaufender Leitungen

Im ungünstigsten Fall weist eine leerlaufende Leitung eine Restladung von 1 pu auf und wird zugeschaltet wenn die Quellenspannung -1 pu aufweist. In diesem Fall erzeugt der Einschaltvorgang eine Wanderwelle mit 2 pu Amplitude. Die Wanderwelle wird am Leitungsende reflektiert und verdoppelt sich auf maximal 4 pu.

Ursache: Spannungsdifferenz beim Einschalten regt Wanderwellen an

Mechanismus: Spannungsverdopplung - Reflexion an Leitungsende im Leerlauf

Problem: **Transiente Einschalt-Überspannungen (bis 4 pu)**

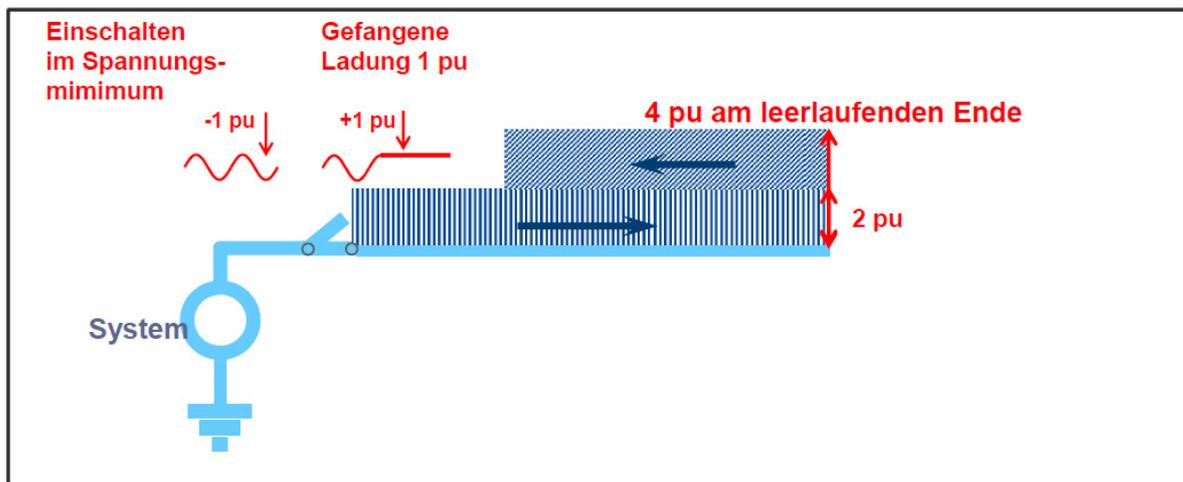


Abbildung 1: Schaltfall leerlaufende Leitung

Eine Studie der CIGRÉ Arbeitsgruppe C4.306 hat aufgezeigt, dass beim Zuschalten leerlaufender Leitungen ohne Gegenmassnahmen mit typischerweise 3.5 pu Überspannung zu rechnen ist (siehe Abbildung 2). Einschaltwiderstände in Kombination mit Überspannungsableiter reduzieren die Belastung auf 1.7 pu. Eine noch geringere Überspannungsbelastung kann kostengünstig durch synchrones Schalten in Kombination mit Überspannungsableiter erreicht werden.

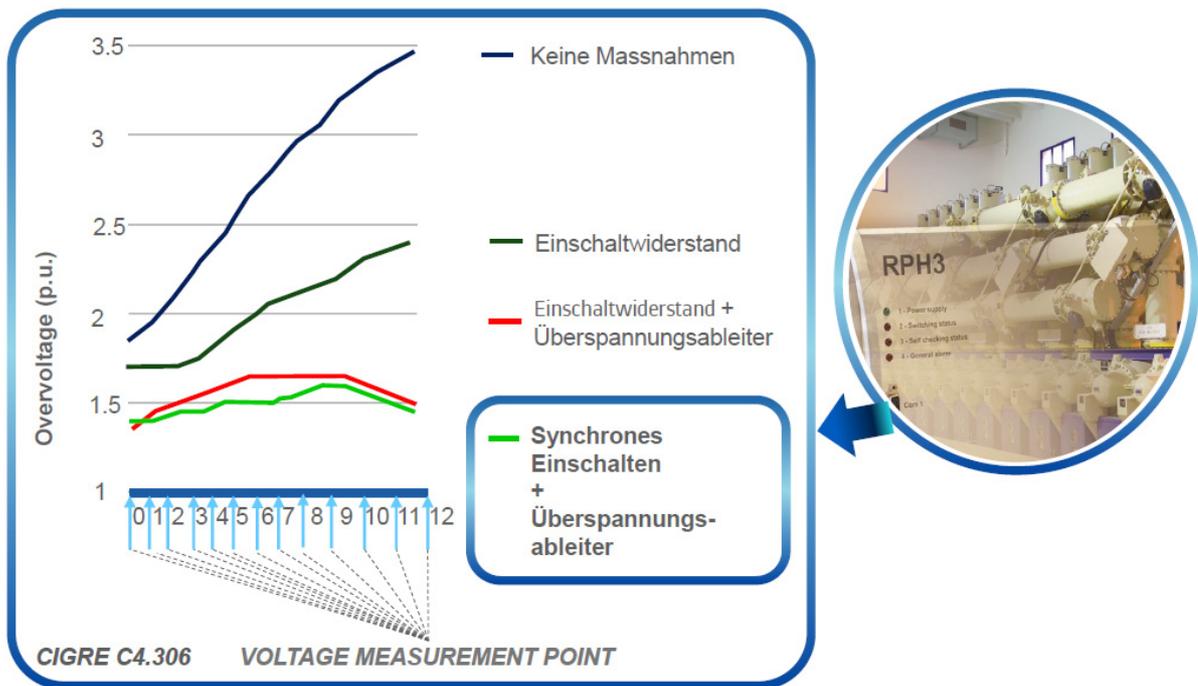


Abbildung 2: Massnahmen zur Reduktion der Belastung beim Zuschalten leerlaufender Leitungen.

In Anwendungen ohne Synchronsteuergerät wird der zufällig eingehende Einschaltbefehl verzögerungsfrei an die Auslösemechanik weitergegeben, sodass die Spannungsamplitude zum Vorzündzeitpunkt ebenfalls zufällig ausfällt. Ein zwischengeschaltetes Synchronsteuergerät berechnet für jede Phase unabhängig eine Schaltverzögerung, sodass der optimale Einschaltzeitpunkt – im vorliegenden Fall der Spannungsnulldurchgang – möglichst genau getroffen wird (siehe Abbildung 3). ALSTOM verwendet als Synchronsteuergerät den RPH3 Controller. Das Synchronsteuergerät muss folgende drei Aufgaben erfüllen:

1. Der vorliegende Schaltfall muss anhand von Strom- und Spannungsmessungen aus dem Netz mit Hilfe von einprogrammierten Netzwerkparametern bestimmt werden.
2. Der optimale Schaltzeitpunkt für jede Phase muss errechnet werden.
3. Das Synchronsteuergerät muss die Schalteigenzeit aufgrund der einprogrammierten Schaltercharakteristik berechnen und Mechanismen kompensieren, welche die Einschaltzeit beeinflussen. Durch die optimal verzögerte Weitergabe des Schaltbefehls der einzelnen Phasen lässt sich die Überspannung im vorliegenden Schaltfall nahezu eliminieren (siehe Abb. 4).

1. Identifizieren des vorliegenden Schaltfalls
2. Bestimmen des optimalen Schaltzeitpunkts
3. Verlässliche Bestimmung der Schalteigenzeit

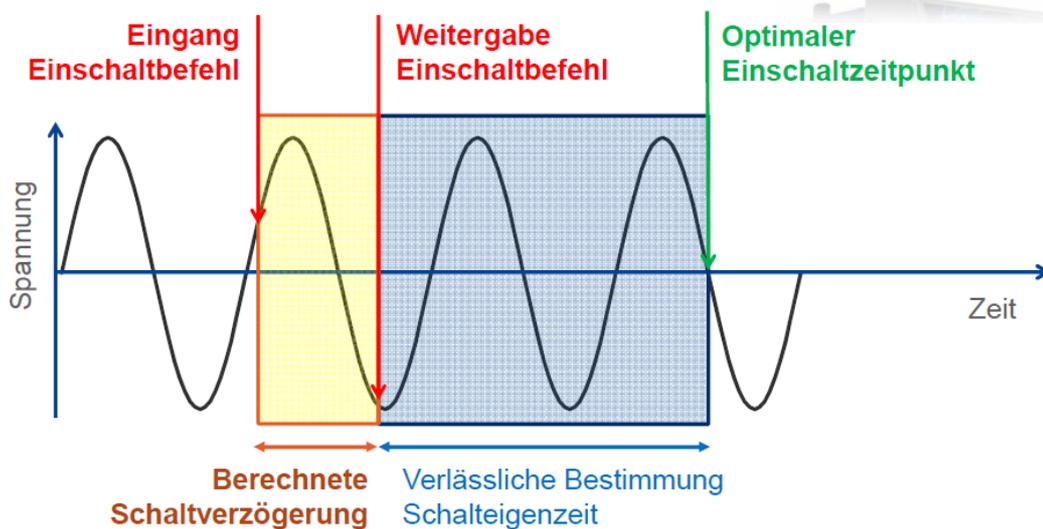


Abbildung 3: Funktionsweise eines Synchronsteuergeräts im Schaltfall zuschalten leerlaufender Leitungen.

Ausschalten im Fehlerfall



Wiedereinschalten

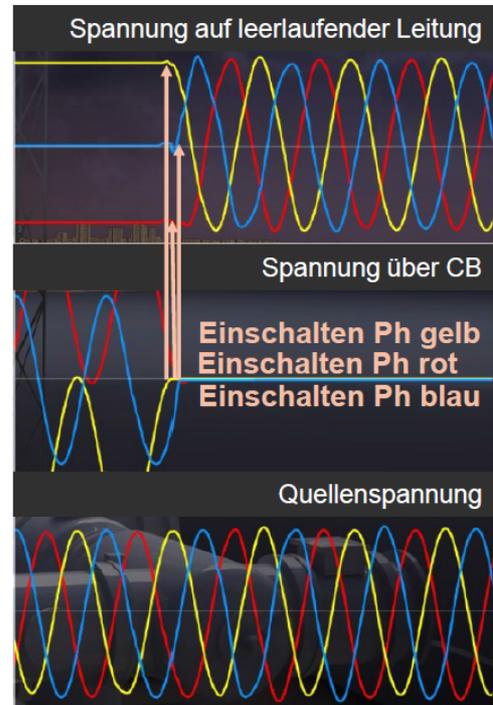


Abbildung 4: Massnahmen zur Reduktion der Belastung beim Zuschalten leerlaufender Leitungen.

Für den optimalen Schaltzeitpunkt ist nicht der Zeitpunkt der Kontaktberührung massgebend, sondern der Zeitpunkt des Vorzündens im Leistungsschalter. Ein Vorzünden in der Schaltkammer tritt auf, sobald die Spannungsfestigkeit – gegeben durch die Rate-of-Decay of Dielectric Strength (RDDS) – einen Schnittpunkt bildet mit dem Betrag der angelegten Spannung über dem Schalter (siehe Abbildung 5).

- **Schliessvorgang:** Reduktion des Kontaktabstands reduziert die Spannungsfestigkeit.
- **Vorzündung:** wenn diel. Festigkeit der Trennstrecke kleiner als Betrag der Spannung.

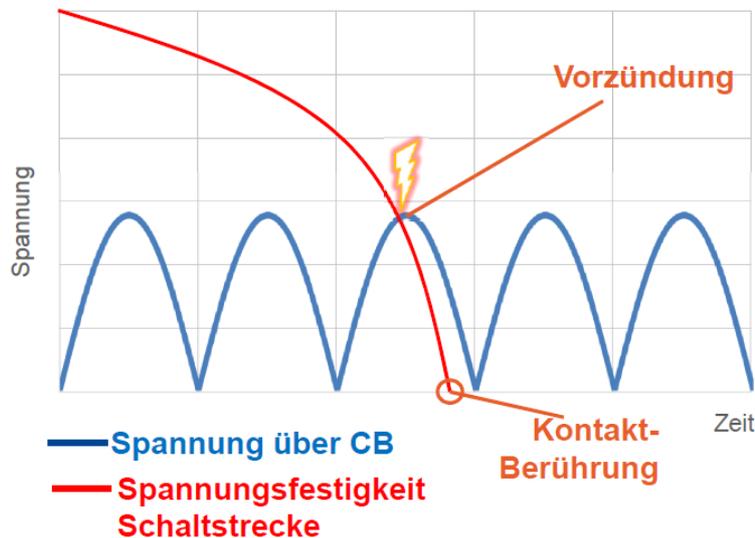
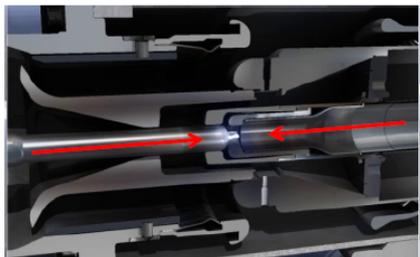


Abbildung 5: Vorzündverhalten im Leistungsschalter

Schalter mit einer flachen RDDS sind nicht optimal geeignet um ohne Vorzündung im Spannungsnulldurchgang einzuschalten (siehe Abbildung 6). Schnelle Schalter, welche zu einer steilen RDDS führen, sind hierzu besser geeignet. Wird hingegen ein Zuschalten im Spannungsmaximum angestrebt – beispielsweise zum Einschalten von Transformatoren – kann auch ein langsamerer Schalter eingesetzt werden.

Nach IEC62271-302 werden Schalter anhand ihres Making-Windows in die drei Klassen 4 ms, 3 ms und 2 ms eingeteilt. Anhand der folgenden drei Beispiele wird aufgezeigt, dass die Streuung der Schaltzeit kritisch ist für ein erfolgreiches phasensynchrones Schalten.

- Abbildung 7 zeigt auf, dass je nach Steilheit der RDDS bei einem Making-Window von 4 ms das Einschalten im Bereich von 0 - 0.85 pu stattfinden kann obwohl ein Zuschalten bei 0 pu angestrebt wurde.
- Abbildung 8 zeigt, dass ein Schalter mit 2 ms Making-Window die Vorzündspannung im selben Schaltfall auf einen Bereich von 0 – 0.55 pu reduziert.
- Wird zusätzlich der Zieleinschaltzeitpunkt leicht verzögert, sodass die Schnittpunkte der streuungsbedingten kürzesten und längsten RDDS mit dem Betrag der Spannung bei denselben Amplituden stattfinden, lässt sich die Vorzündspannung auf den Bereich 0 – 0.35 pu reduzieren (siehe Abbildung 9).

- Langsame Schalter führen zu Vorzündungen
- Reduktion der dielektrischen Festigkeit steiler als Steilheit der 50 Hz Netzspannung

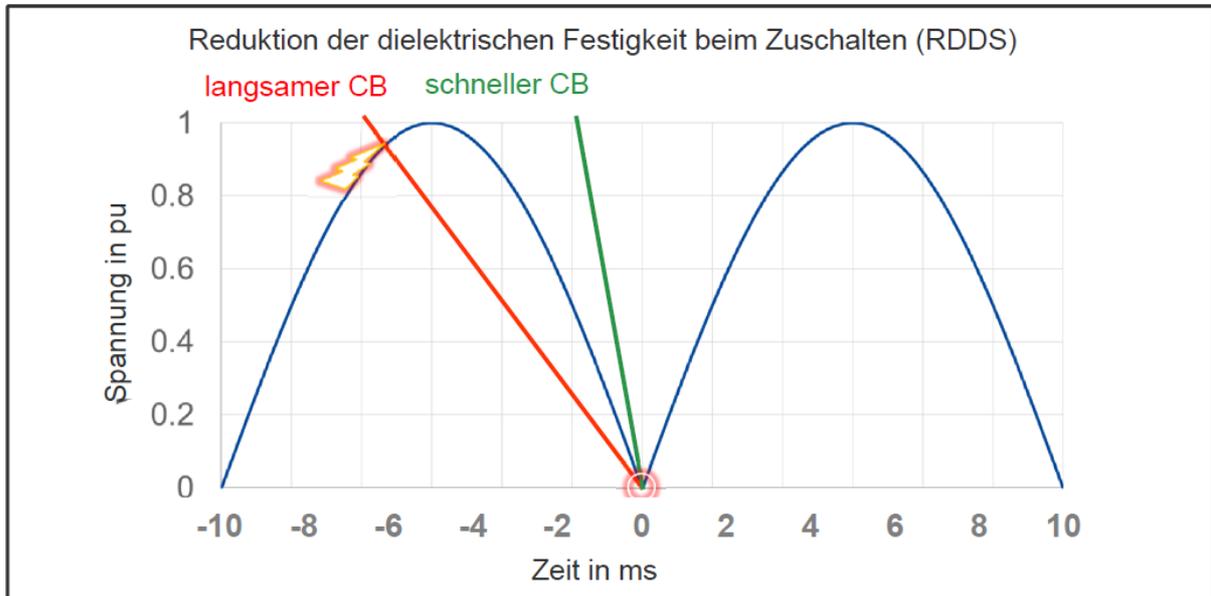


Abbildung 6: Einfluss der RDDS-Steilheit auf das Vorzündverhalten

- IEC62271-302: making window **4 ms** / 3 ms / 2 ms
- **Worst case: Vorzündung bei 0.85 pu**

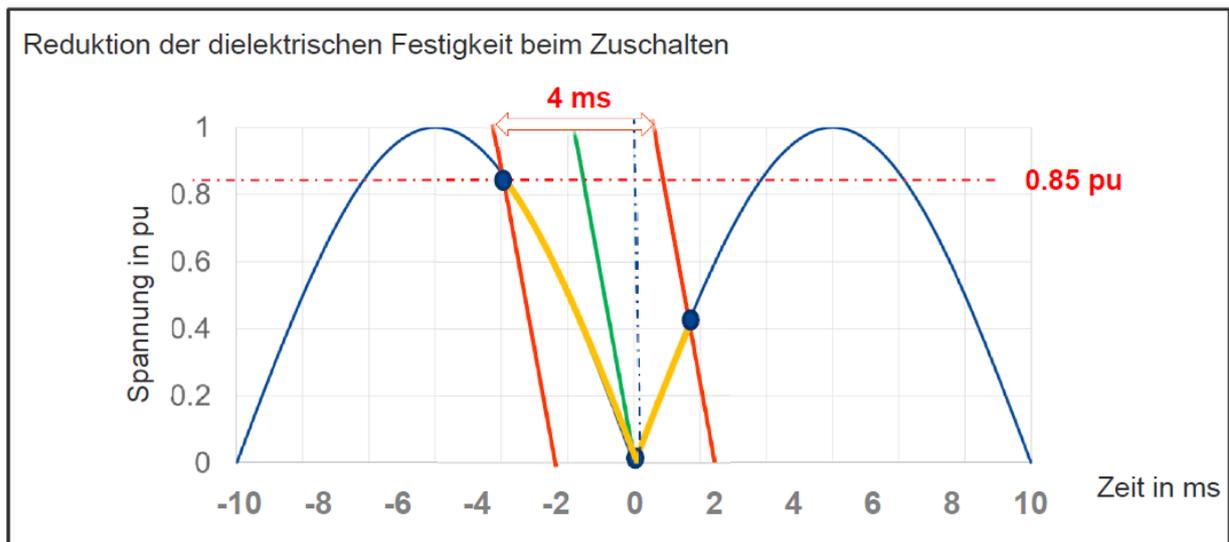


Abbildung 7: Vorzündspannungsbereich eines Schalters mit 4 ms Making-Window.

- IEC62271-302: making window 4 ms / 3 ms / **2 ms**
- **Worst case: Vorzündung bei 0.55 pu**

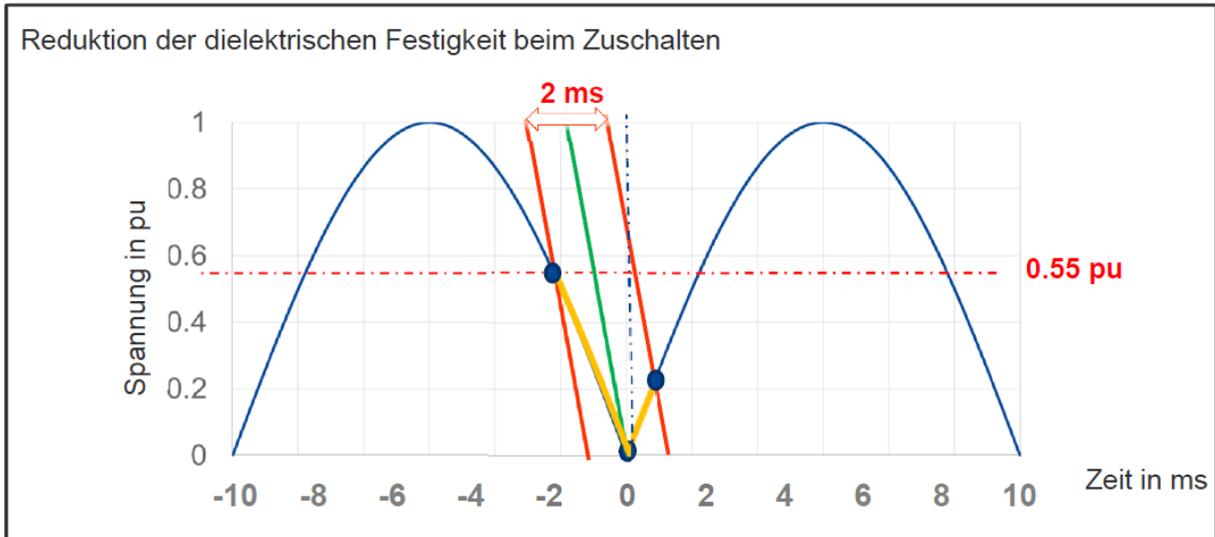


Abbildung 8: Vorzündspannungsbereich eines Schalters mit 2 ms Making-Window.

- IEC62271-302: making window 4 ms / 3 ms / **2 ms mit konstanter Verzögerung**
- **Worst case: Vorzündung bei 0.35 pu**

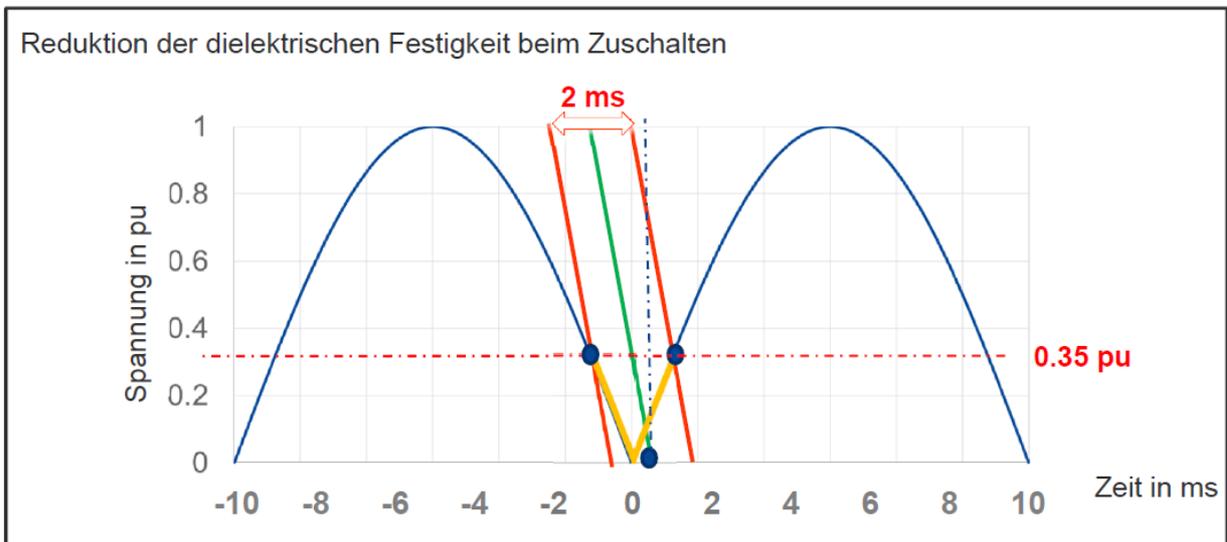


Abbildung 9: Vorzündspannungsbereich eines Schalters mit 2 ms und absichtlich verzögertem Zieleinschaltzeitpunkt.

3. Mechanische Schalteigenzeitstreuung

Bei der Charakterisierung eines Schalters aufgrund der Streuung seiner Schalteigenzeit sind zwei Arten von Streumechanismen zu unterscheiden (siehe Abbildung 10). Eine mechanische Wiederholgenauigkeit ergibt sich aufgrund von mechanischen Toleranzen. Diese Streuung kann nicht kompensiert werden, da sie zufällig auftritt und keinem sich wiederholenden Muster folgt. Die Messungen in Abbildung 11 zeigen auf, dass mit Federspeicherantrieben eine hohe Wiederholgenauigkeit ($\pm 3\sigma$ Streuband von 1 ms) erreicht werden kann, was um einen Faktor 2 kleiner ist als das kleinste geforderte Streuband nach IEC62271-302.

Der zufälligen Streuung ist eine deterministische Streuung der Schalteigenzeit überlagert. Die deterministische Streuung hängt von Einflussmechanismen wie mechanische Alterung, Stehzeit, Steuerspannung, Gasdruck im Schalter und Umgebungstemperatur ab. Hierbei handelt es sich um Effekte, welche deterministisch einem immer gleichen Muster folgen. Nach exakter Ausmessung dieser Effekte für den eingesetzten Schaltertyp im Rahmen der Typentests, lassen sich die Effekte durch das Synchronsteuergerät kompensieren.

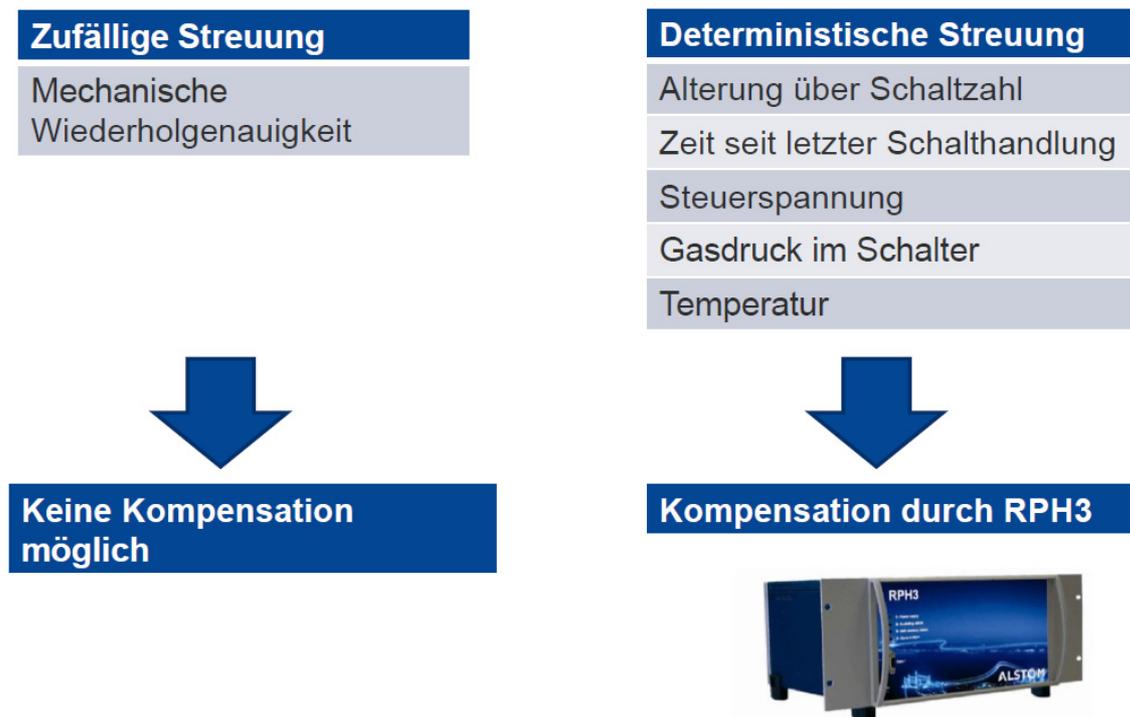
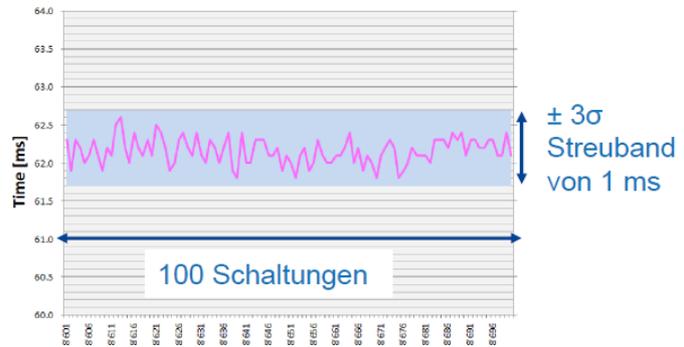


Abbildung 10: Einflussmechanismen auf Schaltzeitstreuung

Beispiel: Mechanische Prüfung FK3-6

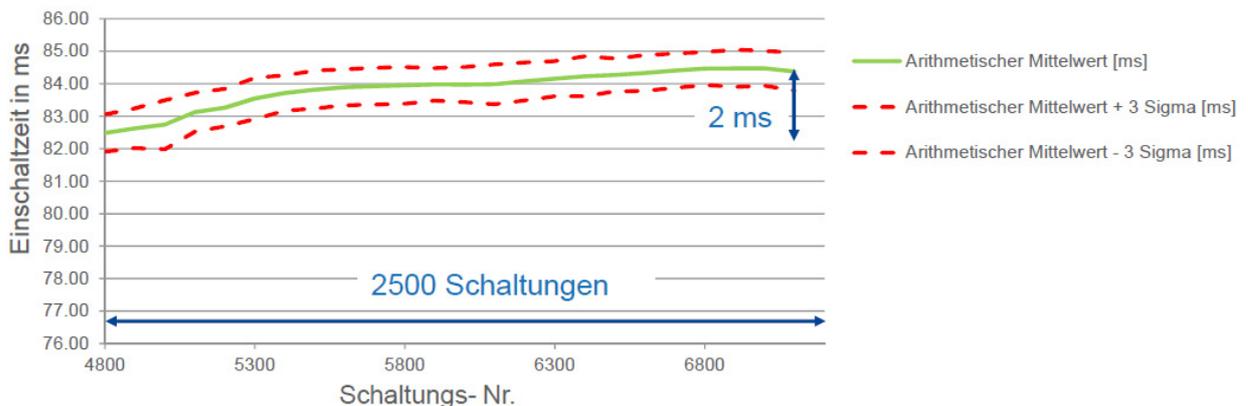


- Federspeicherantriebe erreichen Wiederholgenauigkeit <1 ms
- IEC62271-302: making window 4 ms / 3 ms / 2 ms
- Wiederholgenauigkeit 2x besser als strengste IEC Forderung

Abbildung 11: Wiederholgenauigkeit eines FK3-6 Federspeicherantriebs bei minimaler Versorgungsspannung

Abbildung 12 zeigt die Erhöhung der Einschaltzeit eines FK3-6 Federspeicherantriebs um 2 ms über 2500 Schalthandlungen (durchgezogene grüne Kurve), welche sich mittels Synchronsteuergerät kompensieren lässt. Eine wichtige Erkenntnis aus der Untersuchung ist, dass hierbei das Streuband (rot gestrichelte Kurve) über die Anzahl Schalthandlungen nicht vergrößert wird. Die mechanische Wiederholgenauigkeit verschlechtert sich also nicht über die Lebensdauer des Schalters.

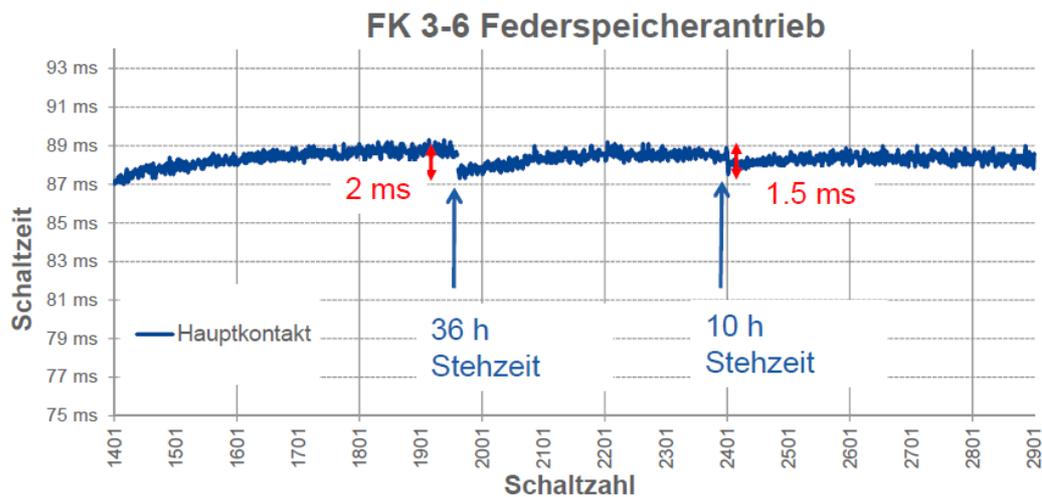
Streuband FK3-6 Federspeicherantrieb



- Mechanische Alterung: Einschaltzeit erhöht sich während Lebensdauer
- Keine Erhöhung des $\pm 3\sigma$ Streuband von 1 ms
- **Automatische Kompensation durch RPH3 Controller**

Abbildung 12: Einfluss der totalen Anzahl Schalthandlungen auf Einschaltzeit

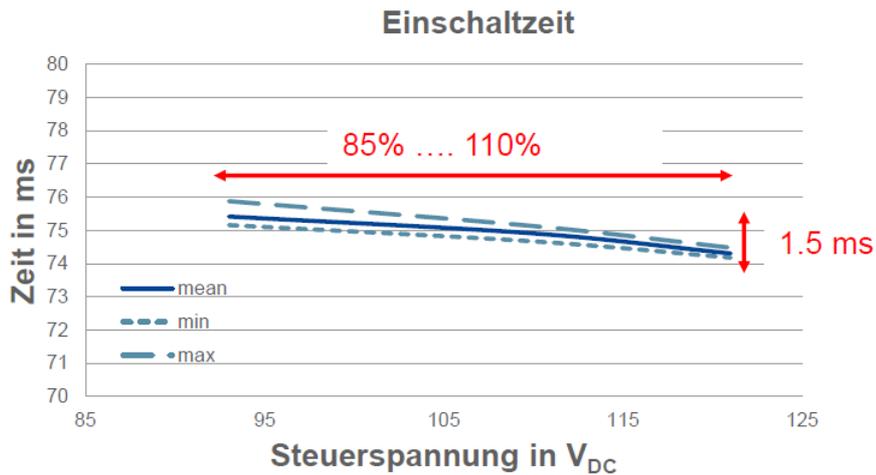
Abbildung 13 zeigt den Einfluss der Stehzeit eines FK3-6 Federspeicherantriebs auf die Einschaltzeit. Es zeigt sich eine Reduktion der Einschaltzeit um bis zu 2 ms nach einer langen Stehzeit. Durch Speicherung des Zeitpunkts der letzten Schalthandlung lässt sich die Schaltzeitreduktion nach einer langen Stehzeit mittels Synchronsteuergerät kompensieren.



- Die erste Schalthandlung nach einer Stehzeit von einigen Stunden ist schneller
- **Automatische Kompensation durch RPH3 Controller**

Abbildung 13: Einfluss der Stehzeit (idle-time) auf die Einschaltzeit

Abbildung 14 zeigt die Reduktion der Einschaltzeit bei ansteigender Versorgungsspannung der Auslösespule der Einschaltklinke im Spannungsbereich von 85% - 100%. Durch Messung der momentanen Versorgungsspannung lässt sich dieser Effekt mittels Synchronsteuergerät kompensieren. Weiter ist ersichtlich, dass sich mit steigender Versorgungsspannung das Streuband der Einschaltzeit reduziert. Die in Abbildung 11 gezeigte Wiederholgenauigkeit wurde bei minimaler Betriebsspannung durchgeführt und stellt somit den ungünstigsten Fall bezüglich der Streuung dar.



- Änderung der Einschaltzeit bei variabler Steuerspannung
- Ursache: Auslösegeschwindigkeit der Auslösespule
- **Automatische Kompensation durch RPH3 Controller**

Abbildung 14: Einfluss der Steuerspannung auf die Einschaltzeit

Anhand von Bewegungsmessungen an einem F35-145 kV Schalter und der Kennlinie der dielektrischen Feldstärke vs. Kontaktabstand wurde die RDDS des Schalters für ein Streuband von 1 ms bestimmt. Es wird die Annahme getroffen, dass sämtliche deterministischen Effekte kompensiert werden und nicht zu einer zusätzlichen Vergrößerung des Streubands beitragen. Anhand der Schnittpunkte der Spannung (blaue Kurve) und der streuungsbehafteten RDDS (rote gestrichelte Kurve) ergeben sich Vorzündspannungen im Bereich von 0 – 0.2 pu (siehe Abbildung 15).

- Bewegungsmessungen der Kontakte im mechanischen Versuch (F35-145kV)
- Kennlinie der dielektrischen Feldstärke der Trennstrecke beim Einschalten
- **Vorzündspannung bei maximal 0.2 pu erreichbar mit 1 ms Streuband**

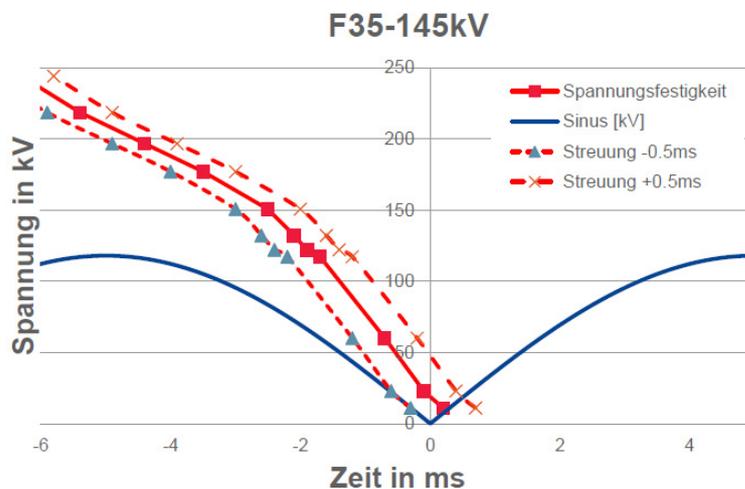


Abbildung 15: Phasensynchrones Einschalten im Spannungsnulldurchgang mit einem F35-145kV Schalter

4. Schaltfall Ausschalten induktiver Lasten

Beim Ausschalten induktiver Lasten nach IEC62271-110 kann es kurz vor dem Stromnulldurchgang zu einem unerwünschten Stromabriss kommen. In diesem Fall treibt die in den induktiven Lasten gespeicherte Energie den Strom weiter, und erzeugt dadurch eine steil ansteigende TRV (Transient Recovery Voltage) über dem Schalter. Als Folge daraus, kann es zu Rückzündungen im Schalter kommen (siehe Abbildung 17), welche hohen Überspannungen mit steilem Anstieg im Frequenzbereich von 100 MHz erzeugen. Diese hochfrequenten Überspannungen belasten umliegende Netzkomponenten und reduzieren deren Lebensdauer.

- Einflussparameter beim Ausschalten von Shunt Drosseln nach IEC62271-110

- Charakteristik der Drossel
- Art der Verbindung zwischen Drossel und Leistungsschalter
- **Leistungsschaltercharakteristik**



- Mechanismen während des Ausschaltens:

- Stromabriss
 - Überspannungen auf der Lastseite
- Widerzündungen des Stroms
 - Hohe und steile Überspannungen (100 MHz) belasten die Drossel und den Leistungsschalter
- Lebensdauer Reduktion

Abbildung 16: Schaltfall Ausschalten induktiver Lasten

- Rückzündung des Stroms während dem Unterbrechen

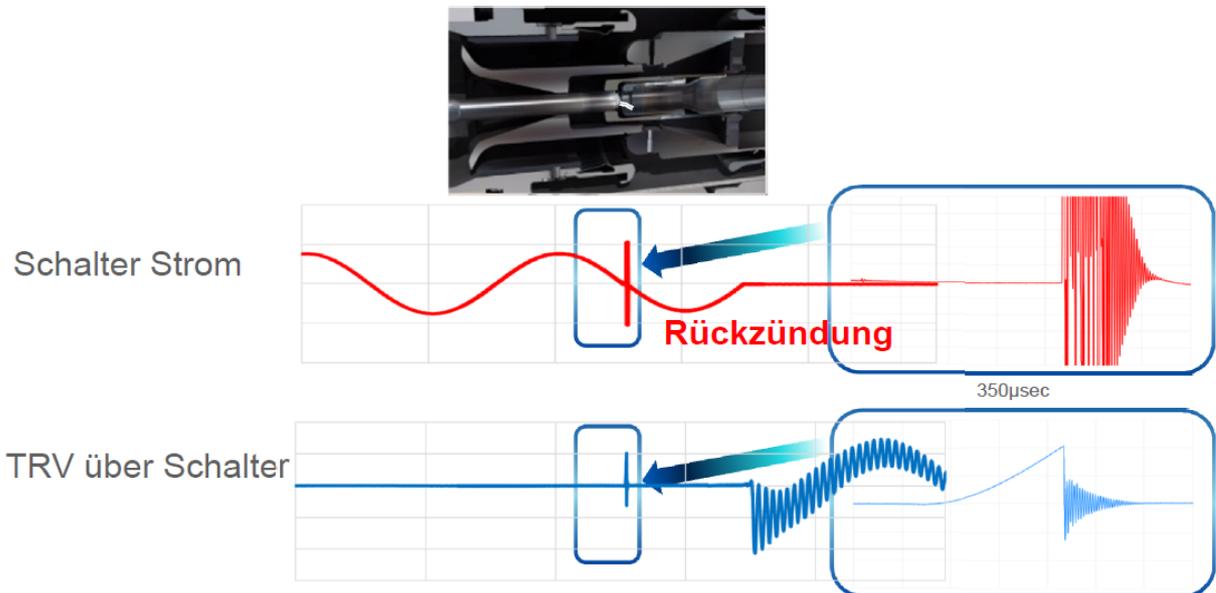


Abbildung 17: Hochfrequente Überspannung als Folge von Rückzündung beim Schalten induktiver Lasten

5. Stromabriss- und Rückzündverhalten in der Schaltkammer

Auch beim gesteuerten Ausschalten induktiver Lasten muss die mechanische Streuung im Synchronsteuergerät berücksichtigt werden. Zusätzlich treten aber noch folgende Mechanismen auf:

- Der Ausschaltzeitpunkt nahe Strom Null ergibt sich durch das thermische Löschen des Lichtbogens in der Schaltkammer unter Berücksichtigung eines möglicherweise verfrühten Stromabrisses.
- Die Rate-of-Rise of Dielectric Strength (RRDS) baut sich aufgrund des Kontaktabstands und der dielektrischen Eigenschaften des Schalters auf. Im Gegensatz zum Einschaltvorgang muss hier zusätzlich das heiße Gas der vorangehenden Hochstromphase des Lichtbogens berücksichtigt werden, welches die dielektrische Festigkeit schwächt.
- Die TRV ergibt sich aufgrund der Steilheit des Stromabrisses und dem Verhältnis zwischen Kapazität im Schalter und Induktivität im Netz.
 - Streuung der Schaltermechanik inkl. Antrieb
 - Thermisches Löschverhalten des Lichtbogens
 - Rate-of-rise of dielectric strength (RRDS)
 - TRV geformt durch umliegendes Netz



Abbildung 18: Einflussmechanismen beim Ausschalten induktiver Lasten

Bei der Kontakttrennung im Schalter entsteht immer ein Lichtbogen und der Strom fließt noch weiter. Der Lichtbogen erzeugt – insbesondere in der Hochstromphase – eine positive Energiebilanz, welche das Gas in der Löschkammer aufheizt und zu einem Druckaufbau im Selbstblasvolumen führt. In der Niederstromphase strömt das Gas aus dem Selbstblasvolumen zurück in die Löschkammer und kühlt den Lichtbogen. Da sich gleichzeitig mit sinkendem Strom die Verlustleistung des Lichtbogens $P=R_{\text{arc}} \cdot I^2$ reduziert entsteht eine negative Energiebilanz und es kommt zum thermischen Löschen des

Lichtbogens. Bei starker Beblasung kann der Lichtbogen und daher der Strom auch bereits kurz vor dem Nulldurchgang abreißen.

- Kontakttrennung – Strom fließt weiter über Lichtbogen.
- Positive Energiebilanz in Hochstromphase – Druckaufbau, heisses Gas
- Negative Energiebilanz nahe Strom Null:
 - Rückströmung von Gas aus Selbstblasvolumen
 - Heizleistung des Lichtbogens minimal: $P = R_{\text{arc}} \cdot I^2$
 - Vorzeitiger Stromabriss

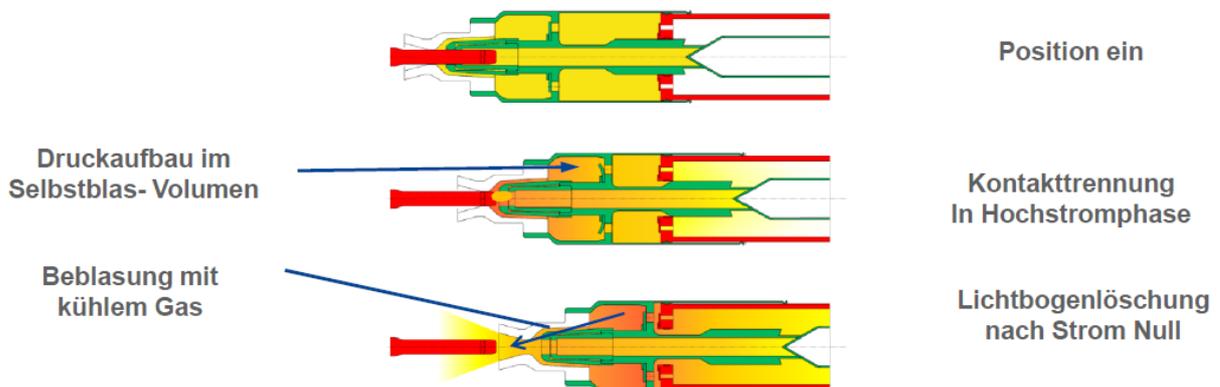
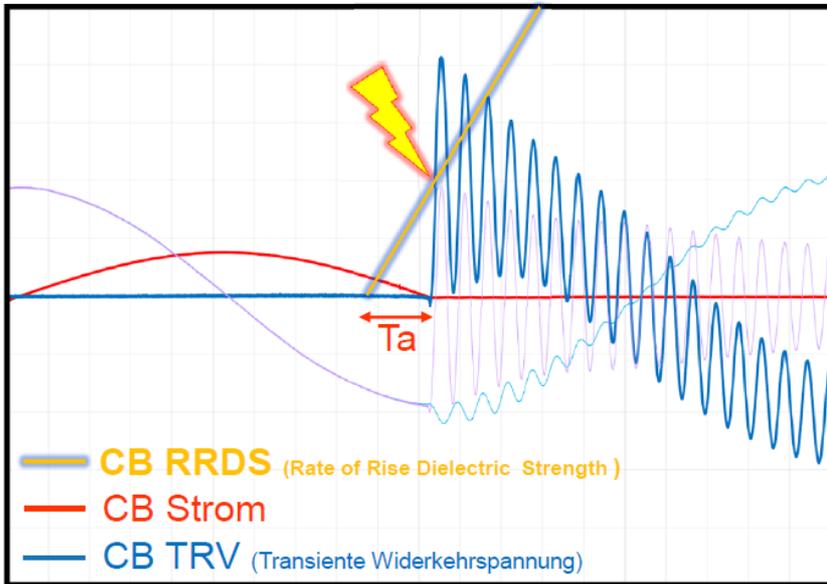


Abbildung 19: Stromunterbrechung in einem AC Selbstblas-Leistungsschalter

Rückzündungen im Leistungsschalter treten auf, wenn sich ein Schnittpunkt zwischen der RRDS Kurve und der TRV ergibt (siehe Abbildung 20). Dies geschieht insbesondere bei kurzen Lichtbogenzeiten aufgrund von vorzeitigem Stromabriss, sodass der Kontaktabstand beim Löschen des Lichtbogens noch nicht ausreicht um die darauffolgende TRV dielektrisch zu halten. Beim gesteuerten Ausschalten wird die Kontakttrennung auf einen ausreichend frühen Zeitpunkt vor dem Stromnulldurchgang gelegt um vor der Lichtbogenlöschung genügend Zeit zum Erlangen der dielektrischen Festigkeit zu haben (siehe Abbildung 21).

• Ursache von Rückzündungen

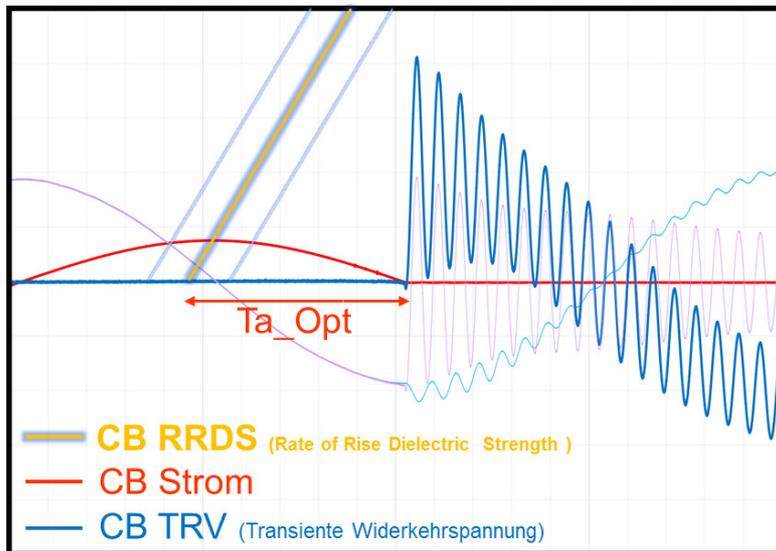


Ta = Lichtbogenzeit

Kurze Lichtbogenzeit – nicht ausreichender Kontaktabstand im CB

Abbildung 20: Rückzündung bei kurzen Lichtbogenzeiten

• Kontrolliertes Ausschalten: Verhindern von Rückzündungen



Ta = Lichtbogenzeit

Ta_Min = minimale rückzündungsfreie Lichtbogenzeit

Mechanische Streuung der Ausschaltzeit

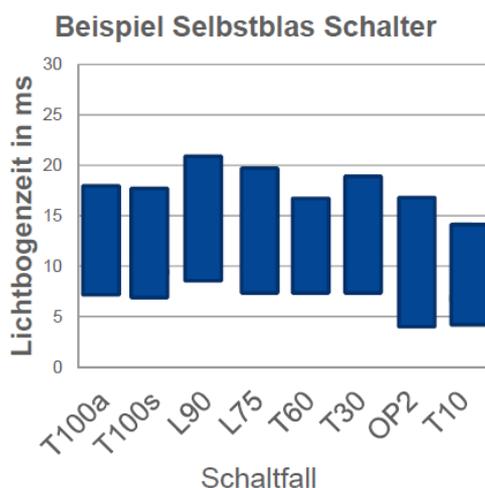
Ta_Opt = Optimierte Lichtbogen Brennzeit

Widerzündungsfreie Lichtbogenzeit

Abbildung 21: Optimierte rückzündfreie Lichtbogenzeit

Beim kontrollierten Ausschalten induktiver Lasten wird der Zeitpunkt der Kontakttrennung optimiert um rückzündfrei eine möglichst kurze Lichtbogendauer zu erreichen. Eine kurze Lichtbogendauer führt zu geringeren Belastungen durch den Kurzschlussstrom. Gleichzeitig wird dadurch der Wandabbrand in der Schalterdüse reduziert, sodass grössere Wartungsintervalle des Schalters zugelassen werden können. Beim Schalten induktiver Ströme nach IEC62271-110 test duty 1 liegt die minimale rückzündfreie Lichtbogenzeit bei typischerweise bei 5-7 ms. Das Lichtbogenfenster und die minimale rückzündungsfreie Zeit variieren von Schaltfall zu Schaltfall. In Abbildung 22 sind die Ausschaltfenster aus verschiedenen weiteren Typentests gegenübergestellt.

- Lichtbogenlöschfenster variiert mit Schaltfall
 - Minimale Lichtbogenzeit zum Aufbau der dielektrischen Festigkeit um im folgenden Stromnulldurchgang zu löschen
- RPH3 optimiert den Schaltzeitpunkt für möglichst kurze Lichtbogendauer



Kurze Lichtbogendauer

= geringere Belastung durch Kurzschlussstrom

= weniger Abbrand im Schalter

= grössere Wartungsintervalle des Schalters

Abbildung 22: Lichtbogenfenster vs. Schaltfall

Zusammenfassend müssen beim kontrollierten Ausschalten induktiver Lasten durch das Synchronsteuergerät folgende Aufgaben erfüllt werden (siehe Abbildung 23):

- Aufgrund der einprogrammierten Netzcharakteristik in Kombination mit Echtzeitauswertung der gemessenen Spannungs- und Stromkurven muss das Synchronsteuergerät den vorliegende Schaltfall identifizieren.
- Anhand der einprogrammierten realen Schaltercharakteristik muss das thermische Löscharverhalten und die dielektrische Wiederverfestigung vorausgesagt werden.
- Mittels der einprogrammierten mechanischen Charakteristik, gespeicherter Daten aus früheren Schalthandlungen und aktuellen Messwerten muss die zu erwartende Eigenzeit berechnet werden. Dies beinhaltet die Kompensation deterministischer Veränderungen der Ausschaltzeit.

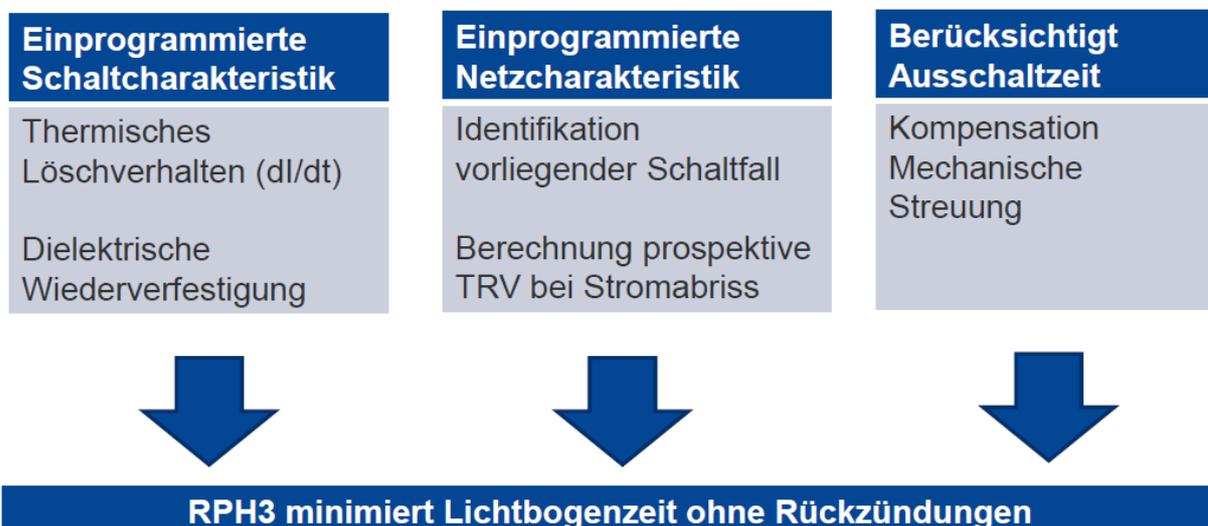


Abbildung 23: Gesteuertes Ausschalten induktiver Lasten mit RPH3

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten: der Schlüssel zu einer zuverlässigen Umsetzung des phasensynchronen Schaltens liegt im Zusammenspiel zwischen Antrieb, Schaltkammer und Synchronsteuergerät.

- Streuungsarme Federspeicherantriebe mit deterministischem Verhalten erlauben einen mechanisch exakt wählbaren Zeitpunkt der Kontakttrennung oder Kontaktberührung.
- Das reale Lösch-, Vorzünd- und Stromabrissverhalten des eingesetzten Schalters muss im Rahmen der Typprüfungen exakt ausgemessen werden.
- Das Synchronsteuergerät muss mit den ausgemessenen mechanischen Einflussparametern, der Schaltercharakteristik und den realen Netzwerkparametern programmiert werden.

Phasensynchrones Schalten möglich durch optimales
Zusammenspiel von Antrieb, Schaltkammer und Controller:



- Streuungsarme Federspeicherantriebe
- Programmierung des Reglers mit realer Schaltercharakteristik
- Adaptive Steuerung lernt aus vorangehenden Schaltungen.

Abbildung 24: Zusammenspiel der Komponenten für gesteuertes Schalten

Das Synchronsteuergerät RPH3 beherrscht sämtliche gängigen Anwendungsfälle, ist parametrisierbar mit der realen Netzwerkcharakteristik und der realen Leistungsschaltercharakteristik. Zusätzlich erlaubt die Adaptive-Control-Routine Abweichungen zwischen den einprogrammierten Charakteristiken und dem realen Verhalten des Schalters respektive der Netzkomponenten auszugleichen. Das RPH3 lernt anhand vorangehender Schaltungen, sodass die Treffgenauigkeit mit steigender Schaltzahl zunimmt.

- RPH3 Steuergerät beherrscht die gängigen Anwendungsfälle
- Parametrisierbar mit realen Netzwerkparametern und realer Leistungsschaltercharakteristik
- Automatische Kompensation von Veränderungen in der Schaltzeit
- Adaptive-control routine: Lernt aus vorangehenden Schalthandlungen



Abbildung 25: Umsetzung des kontrollierten Schaltens im RPH3

FKH - Fachtagung

24. November 2015

Hochspannungs-Leistungsschalter

Typprüfungen für Hochspannungs-Leistungsschalter

Dr. Radu-Marian Cernat
Siemens AG, Berlin

Funktion und beruflicher Werdegang

- 2002: Abschluß des Elektrotechnikstudiums an der TU-Braunschweig
- 2002-2007: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Lehrstuhl für Hochspannungstechnik der TU-Dortmund
- 2007-2013: Entwicklungsingenieur für Hochspannungsunterbrechereinheiten
im Schaltwerk Berlin der Siemens AG,
Schwerpunkt Schaltleistungen und Typprüfungen
- 2013: Promotion an der TU-Dortmund auf dem
Gebiet der numerischen Feldberechnung
- ab 2013: Projektingenieur für Hochspannungs-Leistungsschalter
im Schaltwerk Berlin der Siemens AG

Typprüfungen für Hochspannungs-Leistungsschalter

Radu-Marian Cernat
Siemens AG, Berlin

1. Kurzfassung

Hochspannungs-Leistungsschalter werden in den Stromnetzen der Übertragungs- und Verteilungsebenen eingesetzt um Strompfade in Betrieb zu nehmen bzw. außer Betrieb zu setzen und um fehlerbehaftete Strompfade zu unterbrechen. Als sicherheitsrelevante Netzkomponente unterliegen sie strengen Anforderungen und werden einem komplexen Qualifizierungsprozess unterzogen. Grundlegende Anforderungen werden von der IEC (International Electrotechnical Commission) und dem IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardisiert, wobei nationale Normungsorganisationen zusätzliche länderspezifische Anpassungen veröffentlichen (z.B. GOST-Norm für die russische Föderation oder GB-Standard für die Volksrepublik China). Standardisiert sind unter anderem die Bemessungsgrößen, der Umfang der Typprüfung, sowie die 100 % Stückprüfung der hergestellten Leistungsschalter.

Der vorliegende Vortrag stellt die für Hochspannungs-Leistungsschalter vorgeschriebenen Typprüfungen und deren Anforderungen vor. Ausgehend von den Bemessungsgrößen wird erklärt, welche Parameter in den einzelnen Typprüfungen nachgewiesen werden. Gemäß der gültigen Standards werden die Typprüfungen in dielektrische, mechanische und schaltleistungstechnische Prüfungen unterteilt. Die dielektrischen Prüfungen weisen nach, dass das geprüfte Gerät den Anforderungen der Isolationskoordination für die definierte Spannungsebene genügt. Im Rahmen der mechanischen Prüfungen wird nachgewiesen, dass der Leistungsschalter den thermischen und strukturmechanischen Anforderungen über den vollen Bereich der Einsatzbedingungen erfüllt. Bei den Schaltleistungsprüfungen wird das Aus- und Einschaltverhalten des Schaltgerätes unter normalen Betriebsbedingungen und im Fehlerfall dokumentiert. Um die geforderten Prüfparameter unter Laborbedingungen nachzubilden werden in der Schaltleistung synthetische Prüfverfahren eingesetzt, die abschließend kurz erläutert werden.

2. Keywords

Bemessungswerte eines Hochspannungs-Leistungsschalters

Übersicht der vorgeschriebenen Typprüfungen

Dielektrische Typprüfungen und Isolationskoordination

Mechanische Typprüfungen

Aus- und Einschaltprüfungen

Stromunterbrechung im induktiven Kreis

TRV-Parameter für Kurzschlussprüfungen

Sternpunktbehandlung, Lichtbogenzeiten und Polfaktoren

Synthetisches Prüfen



Dr. Radu-Marian Cernat

Typprüfungen für Hochspannungs-Leistungsschalter

siemens.com/answers

Gliederung

SIEMENS

- **Aufgaben eines Leistungsschalter**
- **Standardisierung und Bemessungsgrößen**
- **Dielektrische Prüfungen**
- **Mechanische Prüfungen**
- **Aus- und Einschaltprüfungen**
 - **Stromunterbrechung**
 - **Transiente Wiederkehrspannung**
 - **Lichtbogenzeiten**
 - **Polfaktoren**
 - **Synthetisches Prüfen**
- **Übersicht relevanter Normen**

Aufgaben eines Leistungsschalters



Geschlossen: dauerhaft Betriebsströme und kurzzeitig Kurzschlussströme führen

→ thermische und strukturmechanische Belastung



Strompfade außer Betrieb setzen und Kurzschlussströme unterbrechen

→ Ausschaltvermögen



Offen: netzfrequente Spannung halten und für kurze Zeit Überspannungen widerstehen

→ dielektrische Belastung



Strompfade in Betrieb nehmen und im Fehlerfall sicher einschalten (z.B. bei einer KU)

→ Einschaltvermögen

3

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Normen

- Definieren Anforderungen an alle Komponenten des Verbundnetzes
- Ermöglichen den sicheren Aufbau und Betrieb des Verbundnetzes
- Sichern die Vergleichbarkeit der Performance einzelner Geräte
- Stellen einen Konsens zwischen Nutzer und Hersteller bezüglich der Qualifizierung der Geräte dar
- Berücksichtigen regionspezifische Voraussetzungen



4

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Bemessungsgrößen

• Bemessungsspannung	420 kV
• Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung	610 kV
• Bemessungs-Stehschaltstoßspannung	900 + 345 kV
• Bemessungs-Stehblitzstoßspannung	1425 + 240 kV
• Bemessungsfrequenz	50 Hz und 60 Hz
• Bemessungs-Betriebsstrom	5000 A bei +40 °C
• Bemessungs-Kurzzeitstrom	63 kA für 3 s
• Bemessungs-Stoßstrom	2,7 p.u.
• Bemessungs-Kurzschlussausschaltstrom (Isc)	63 kA
• Gleichstromzeitkonstante	45 ms
• Einschwingspannung bei Isc	720 kV
• Polfaktor	1,3 / 1,5 p.u.
• Bemessungs-Ausschaltstrom unter Asynchronbed.	15,8 kA
• Polfaktor unter Asynchronbedingungen	2,0 / 2,5 p.u.
• Bemessung-Freileitungs- und -Kabelausschaltstrom	400 A
• Kapazitiver Überspannungsfaktor	1,4 p.u.
• Bemessungsschaltfolge	O - 0,3 s - CO - 3 min - CO
• Bemessungs-Ausschalteigenzeit	2 Perioden
• Klassifizierung	M2
• Standard	IEC 62271 - 100

5

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Dielektrische Prüfungen

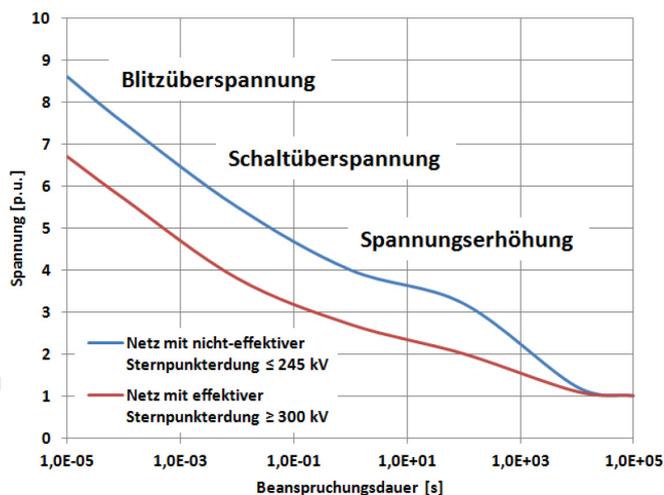
Isolationskoordination (IEC 60071) →

- Systemanalyse
- Netzerfahrung
- Isolationseigenschaften
- Schutzpegel
- Akzeptable Fehlerrate
- Auftrittswahrscheinlichkeit
- Sicherheitsfaktoren
- Atmosphärische Korrektur

=> **Bemessungsisolationspegel**

Garantiert einen sicheren Betrieb der Netzkomponenten bis zum Erreichen der Schutzgrenze

Absicherung der Netzkomponenten gegenüber Überspannungen



6

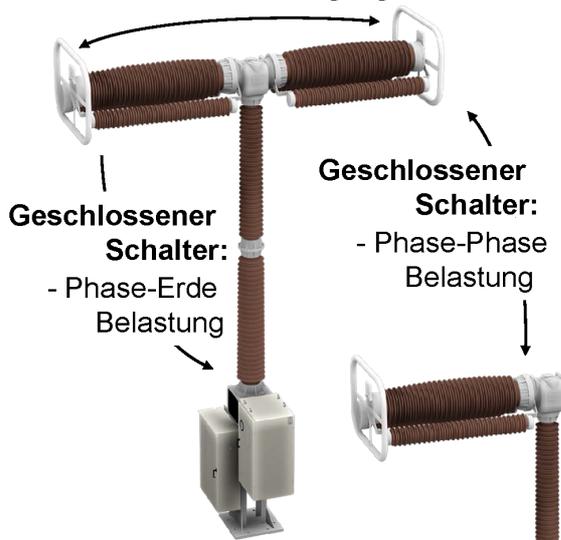
24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Dielektrische Prüfungen

Offener Schalter:

- Schaltstreckenbedingungen
- Trennstreckenbedingungen



Erforderliche Prüfungen (IEC 62271)

- Stehwechselspannung
- Schaltstoßspannung (nur ab 300 kV)
- Blitzstoßspannung
- Regenprüfung
 - bis 245 kV mit Wechselspannung
 - ab 300 kV mit Schaltstoßspannung
- Salznebelprüfung, Fremdschichtprüfung
 - bei Einsatz in Umgebung mit starker Verschmutzung (Küstennähe, Wüste)
 - mit Wechselspannung (IEC 60507)
- Messung der Funkstörspannung (RIV)
- Teilentladungsmessung
 - nur gekapselte Anlagen
- EMV Störfestigkeit und Isolationsprüfung der Sekundärtechnik

7

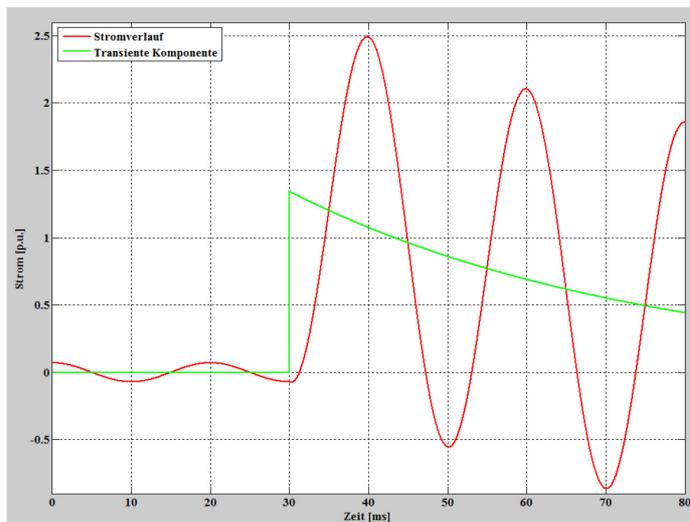
24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Mechanische Prüfungen

Belastungen durch Stromfluss:

- thermische Belastung durch Betriebsstrom (Erwärmungsprüfung)
- strukturmechanische und thermische Belastung durch Kurzschlussstrom (STC / PWC)



8

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

- Stoßbelastung aufgrund induktiver Netze
- Überlagerung eines transienten Vorgangs
- 2.5 p.u. für $f = 50$ Hz und $\tau = 45$ ms
- 2.6 p.u. für $f = 60$ Hz und $\tau = 45$ ms
- 2.7 p.u. frequenzunabhängig für höhere Zeitkonstanten (p.u. Werte bezogen auf den Effektivwert)

Mechanische Prüfungen

Mechanische Funktionsprüfungen:

- Dauerschaltungen bei Umgebungstemperatur
 - Klasse M1: 2 000 Schaltspiele
 - Klasse M2: 10 000 Schaltspiele
- Grenztemperaturprüfung
 - Funktionsnachweis für den spezifiziertem Temperaturbereich
- Druck- und Dichtigkeitsprüfung
- Erdbebenprüfung
 - nach IEC rechnerischer Nachweis ausreichend
 - für IEEE ab 169 kV Ebene prüftechnischer Nachweis erforderlich
- Überprüfung der IP-Schutzklasse des Steuer- und Antriebsschranks
- Belastung durch Wind und Seilzug

Aus- und Einschaltprüfungen

Klemmenkurzschluss-Ausschaltvermögen:

- Ausschaltvermögen über den gesamten Strombereich exemplarisch mit Versuchen bei 10%, 30%, 60% und 100% des I_{sc} nachgewiesen
- IEC: Versuche mit asymmetrischen Stromfluss bei 100% des I_{sc}
- IEEE: Versuche mit asymmetrischen Stromfluss bei allen Stromstufen

Abstandskurzschluss-Ausschaltvermögen:

- erhöhte Spannungsbelastung durch überlagerte Wanderwellen
- Nachweis bei (60%), 75% und 90% des I_{sc}
- einphasiger Fehlerfall

Schaltvermögen unter Asynchronbedingungen:

- Einschalten unter Phasenoppositionsbedingungen
- Ausschalten nach fehlgeschlagener Synchronisation

Kapazitives Schaltvermögen:

- Schalten von leerlaufenden Freileitungen, Kabeln, einzelnen oder parallelbetriebenen Kondensatorenbanken (Inrush Vorgänge)

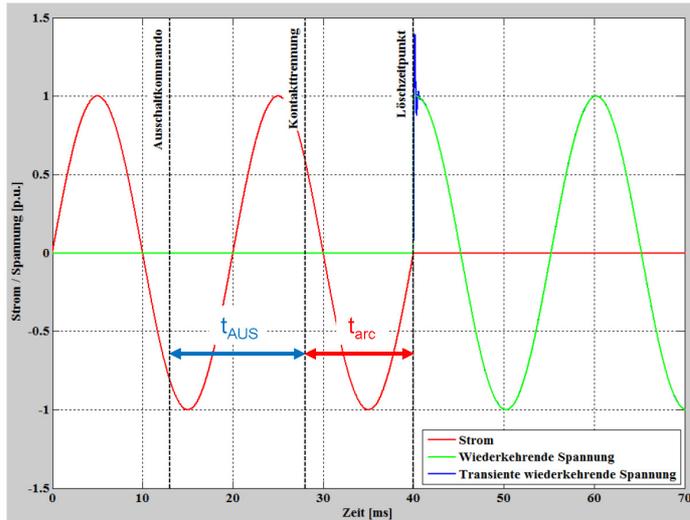
Unterbrechung kleiner induktiver Ströme:

- Überspannungen durch induktive Abreisströme

Stromunterbrechung

Allgemeiner Ausschaltvorgang

- Übertragungsnetze haben induktiven Charakter
- Stromunterbrechung nur in einem natürlichen Stromnulldurchgang möglich



11

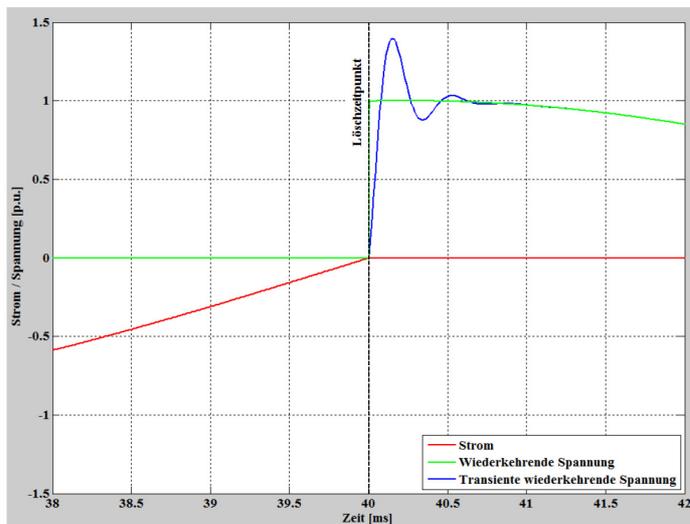
24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

- Ausschaltkommando bei beliebiger Phasenlage
- t_{AUS} schalterspezifische Ausschaltzeit
- Kontakttrennung bei beliebiger Phasenlage
- t_{arc} Lichtbogenphase
Kontaktabstand wird aufgebaut
- Stromunterbrechung im nächsten Stromnulldurchgang

Spannungsbelastung

- Übertragungsnetze haben induktiven Charakter
- Stromunterbrechung im Spannungsmaximum
- Überspannungen durch transienten Einschwingvorgang



12

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Harmonische Schwingkreise

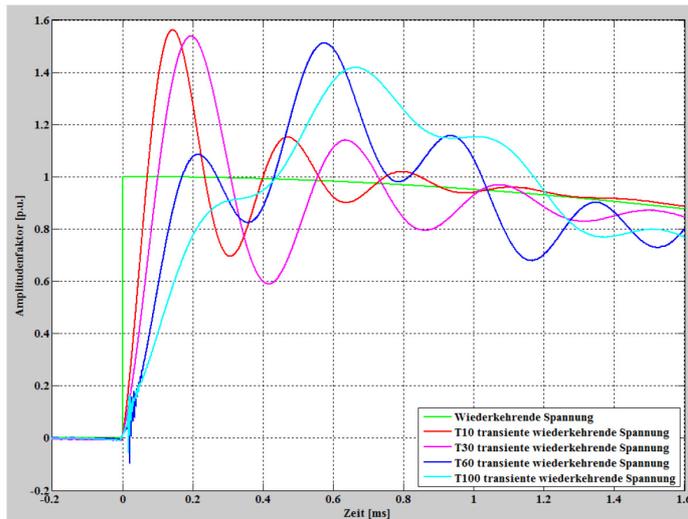
- Hochspannungs-transformatoren
- Netzinduktivität
- parasitäre Kapazitäten
- Eigenkapazität des Leistungsschalters

Wanderwellen

- Reflexionen auf Freileitungen, Sammelschienen und in gasisolierten Anlagen

Transiente Wiederkehrspannung

- Transformatorgespeiste Kurzschlüsse (abgedeckt durch T10 und T30)
- Kurzschlüsse mit mehreren Speisequellen (nachgebildet durch T60 und T100)



- T10 (10 % vom I_{sc})
Spannungssteilheit 7 kV/ μ s
Amplitudenfaktor 0,9 x 1,7 p.u.
- T30 (30 % vom I_{sc})
Spannungssteilheit 5 kV/ μ s
Amplitudenfaktor 1,54 p.u.
- T60 (60 % vom I_{sc})
Spannungssteilheit 3 kV/ μ s
Amplitudenfaktor 1,5 p.u.
- T100 (100 % vom I_{sc})
Spannungssteilheit 2 kV/ μ s
Amplitudenfaktor 1,4 p.u.

gültig für Hochspannungsleistungsschalter ≥ 100 kV

13

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Lichtbogenzeiten

$t_{arc\ min}$: minimale Lichtbogenzeit

- Zeit die der Schalter braucht um löschfähig zu werden
- kürzeste Zeit in der der Strom unterbrochen werden kann

$t_{arc\ max}$: maximale Lichtbogenzeit

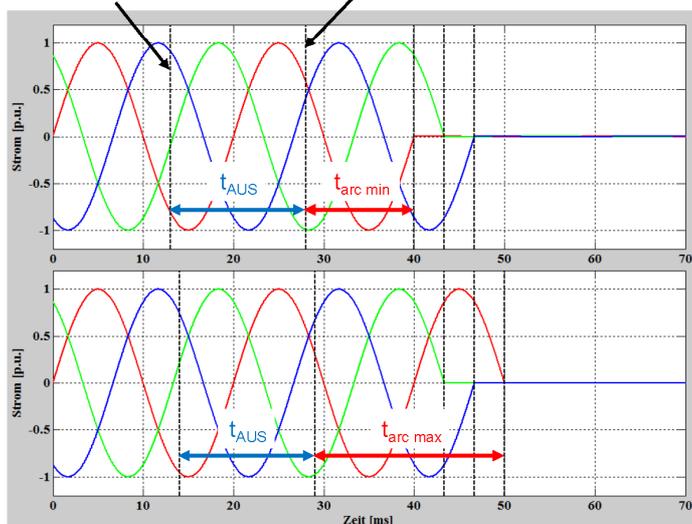
- längste erreichbare Lichtbogenzeit
- $t_{arc\ min} + \frac{1}{2}$ Periode - ϵ

Zusätzliche Normforderungen:

- Nachweis von $t_{arc\ min}$
- Versuch mit mittlerer Lichtbogenzeit

Darstellung gültig für Netzen mit unmittelbar geerdetem Sternpunkt.

Ausschaltkommando Kontakttrennung



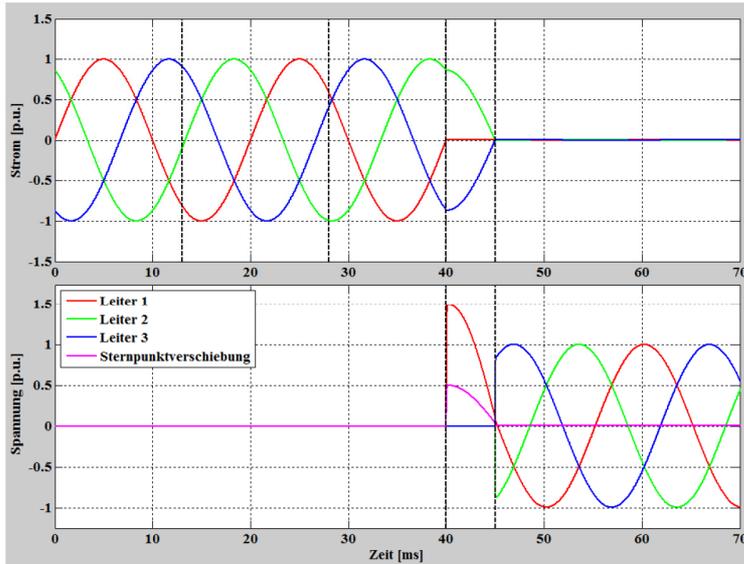
14

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Netz mit nicht-effektiver Sternpunktterdung

- Überspannung in der erstlöschenden Phase durch Sternpunktverschiebung
- phasenverschobener Strom in den beiden anderen Phasen



15

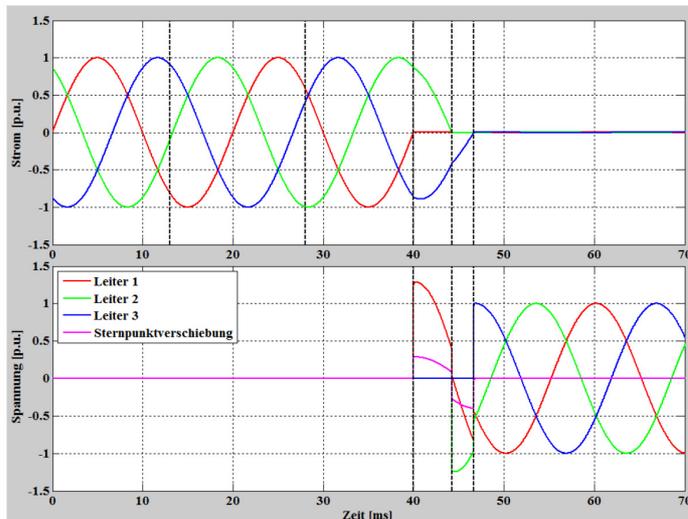
24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

- Vertreten in Spannungsebenen < 245 kV
- erstlöschende Phase
Polfaktor 1.5 p.u.
- leztlöschende Phasen
Polfaktor 0.866 p.u.

Netz mit effektiver Sternpunktterdung

- Überspannung in der erst- und zweitlöschenden Phase bedingt durch die Sternpunktverschiebung
- verschobener Nulldurchgang der zweitlöschenden Phase



16

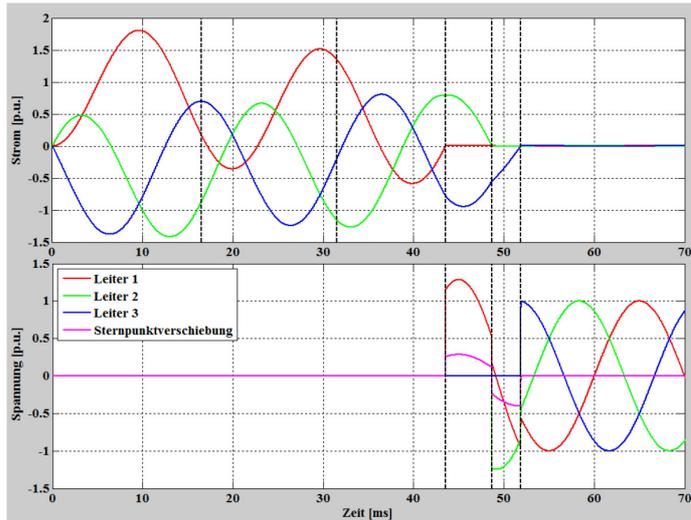
24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

- eingesetzt in Spannungsebenen ≥ 245 kV
- erstlöschende Phase
Polfaktor 1.3 p.u. (≤ 800 kV)
Polfaktor 1.2 p.u. (> 800 kV)
- zweitlöschende Phase
Polfaktor 1.27 p.u. (≤ 800 kV)
Polfaktor 1.15 p.u. (> 800 kV)
- leztlöschende Phasen
Polfaktor 1.0 p.u.

Asymmetrischer Stromverlauf

- verschobene Phasenlage der Stromnulldurchgänge durch überlagerte transiente Komponente
- reduzierte Wiederkehrspannung in der erst- und zweitlöschenden Phase



Stromparameter abhängig von:

- Netzfrequenz
- Gleichstromzeitkonstante
- minimale Ausschaltzeit

Reduktion der Wiederkehrspannung beeinflusst durch:

- Phasenlage zum Löschzeitpunkt
- Stromsteilheit zum Löschzeitpunkt

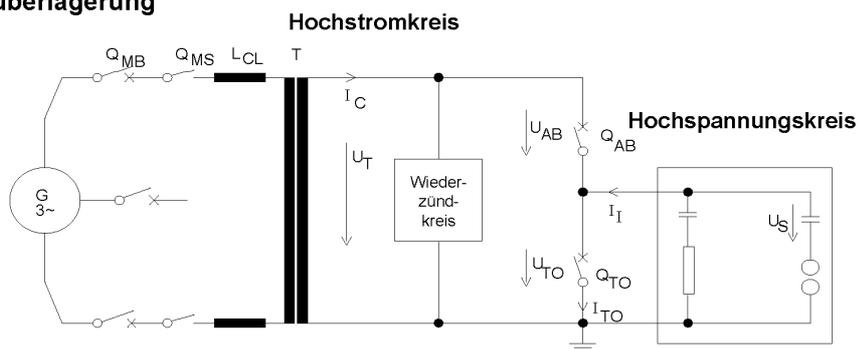
17

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Synthetisches Prüfen

Stromüberlagerung

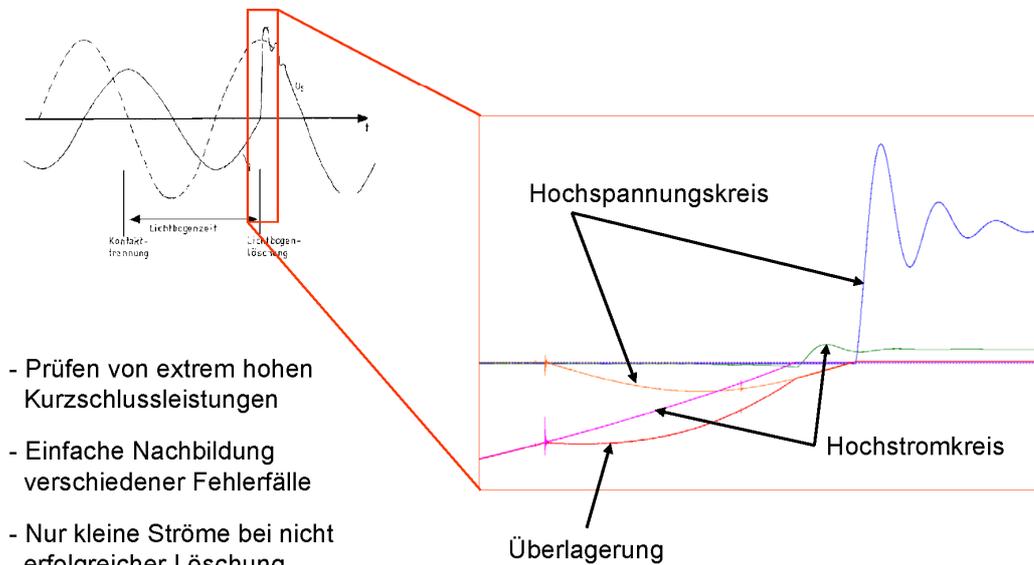


18

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Synthetisches Prüfen



19

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Übersicht relevanter Normen (IEC)

IEC 62271-1	High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications
IEC 62271-100	High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers
IEC 62271-101	High-voltage switchgear and controlgear - Part 101: Synthetic testing
IEC 62271-110	High-voltage switchgear and controlgear - Part 110: Inductive load switching
IEC 62271-302	High-voltage switchgear and controlgear - Part 302: Alternating current circuit-breakers with intentionally non-simultaneous pole operation
IEC 62271-306	High-voltage switchgear and controlgear - Part 306: Guide to IEC 62271-100, IEC 62271-1 and other IEC standards related to alternating current circuits-breakers

20

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Übersicht relevanter Normen (nicht IEC)

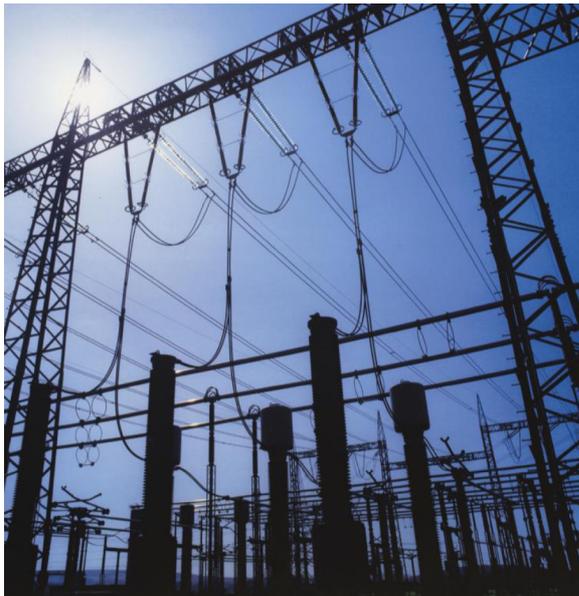
- C37.04 - IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers**
- C37.06 - IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis--Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V**
- C37.09 - IEEE Standard Test Procedure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis**
- C37.09a - IEEE Standard Test Procedure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis Amendment 1: Capacitance Current Switching**
- C37.081 - IEEE Guide for Synthetic Fault Testing of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis**
- GOST - 1516.3 - Electrical Equipment for A.C. Voltage from 1 kV to 750 kV Requirements for Electric Strength of Insulation**
- GOST R 52565 - Alternating-Current Circuit-Breakers for Voltage from 1 kV to 750 kV General Specification**

21

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Contact



Dr. Radu-Marian Cernat
Electrical Engineering and Testing

EM HP AIS R&D CF EE
Nonnendammallee 104
13629 Berlin, Germany

Tel.: +49 172 1484565
Fax: +49 30 386-22944
E-mail:

radu-marian.cernat@siemens.com

siemens.com

22

24.11.2015

Dr. Cernat / EM HP AIS R&D CF EE

Referentenadressen

Aschwanden, Dr.	Thomas	AF Engineers + Consultants (AFEC) GmbH Haus Kreuz Brügg 57 3807 Iseltwald	th.aschw@bluewin.ch
Cernat, Dr.	Radu- Marian	Siemens AG, Nonnendammallee 104 D-13629 Berlin	radu-marian.cernat@siemens.com Tel.: +49 172 148 45 65
Holaus, Dr.	Walter	ABB Schweiz AG Brown-Boveri-Strasse 5 8050 Zürich	walter.holaus@ch.abb.com Tel.: +41 58 588 17 83
Linder	Christian	Axpo Power AG Parkstrasse 23 5401 Baden	christian.lindner@axpo.com Tel.: +41 56 200 34 90
Lüscher	Robert	ALSTOM Grid GmbH Carl-Sprecher-Strasse 3 5036 Oberentfelden	robert.luescher@alstom.com Tel.: +41 62 737 39 56
Stanek, Dr.	Michael	ABB Schweiz AG Brown-Boveri-Strasse 5 8050 Zürich	michael.stanek@ch.abb.com Tel.: +41 058 588 16 65
Teichmann, Dr.	Jörg	Siemens AG Nonnendammallee 104 D-13629 Berlin	joerg.teichmann@siemens.com Tel.: +49 1726 104 055
Walter, Dr.	Michael	ALSTOM Grid GmbH Carl-Sprecher-Strasse 3 5036 Oberentfelden	michael.m.walter@alstom.com Tel.: +41 58 506 17 63

Internetseite für nachträgliche Informationen zur Fachtagung

Internetseite: <http://46.140.26.42/>

Benutzername: FT2015

Passwort:
(wird anlässlich der Tagung angegeben)

Die Gross-/Kleinschreibung muss bei der Eingabe des Benutzernamens und des Passwortes berücksichtigt werden.

Bei der Benutzung des Microsoft Internet-Explorers Version 7.0 muss die Freigabe zum Download aus Web-Seiten vor dem Aufruf des FKH-Fileservers erfolgen, sonst tritt ein Fehler auf. Bei allen anderen Versionen und Browsern kann der Download auch bei Rückfrage des Browsers noch bestätigt werden.

