SIEMENS

ZIEHL IV, 11. - 12. März 2014, Bonn

Auslegung supraleitender Strombegrenzer im Hochspannungsnetz

Wolfgang Schmidt, Siemens AG, Corporate Technology, Erlangen

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Bedarf an Strombegrenzern in Energieübertragungsnetzen

SIEMENS

Zitat aus einer Studie der Navigant Consulting (2006) für das US-DOE:
"Increasing loads on the existing power transmission system, coupled with lack of investment, lead to a growing demand for current limiting devices.

The perfect fault current limiting device features an instantaneous, self triggered transition from near zero impedance to above grid impedance in case of a fault.

→ **S**uperconducting **F**ault **C**urrent **L**imiters (**SFCL**) can provide the solution. "

"The most important near term energy and utility markets appear to be fault current limiters and synchronous condensers."

High Temperature Superconductors (HTS) Peer Presentation Document – July 25, 2006 Navigant Consulting, Inc.

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Strombegrenzern in Energieübertragungsnetzen

Maßnahmen gegen erhöhte Kurzschlussströme im Hochspannungs-Netz:

- Netzausbau, Schalter für höhere Ausschaltströme (max 80 kA)
- Aufspaltung in Teilnetze, Sammelschienentrennung
- Einsatz von Drosseln
- Strombegrenzer
- ~~Pyroelektrische Begrenzer, Sicherungen~~

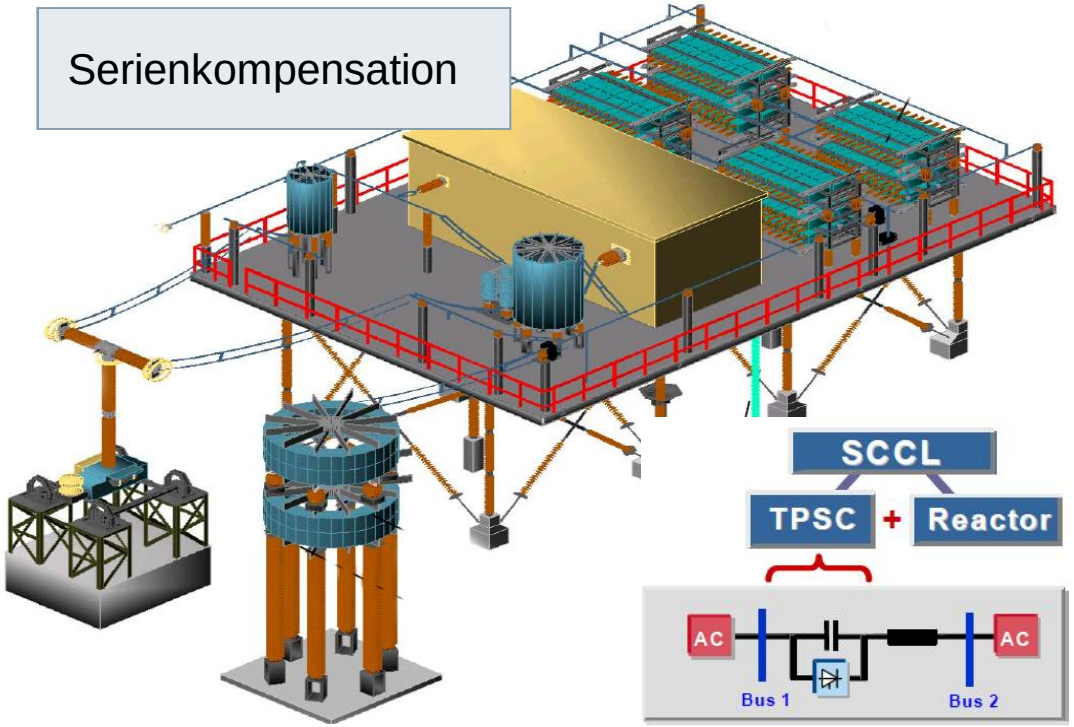
Strombegrenzer umgehen die Nachteile von Netzausbau und Drosseln.
Sie ermöglichen niedrigen Netzinnenwiderstand d.h. hohe prospektive Kurzschlussströme bei gleichzeitig reduzierten tatsächlichen Kurzschlussströmen.

Vorteile von Strombegrenzern:

- Stabilere Netzspannung (z.B. bei unruhigen Lasten)
- Nutzung vorhandener Schaltanlagen trotzErhöhung der Einspeiseleistung
- Neue Anlagen und Netze können für geringere Kurzschlussströme ausgelegt werden
- Stärkere Vermaschung vorhandener Netze
- Selbsttätiges Auslösen, Eigensicherheit

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Aktuelle Begrenzertypen für Hochspannung (HV) - konventionell



Bildnachweis:
- Siemens AG,
- Trench Austria

SCCL = Short Circuit Current Limiter
TPSC = Thyristor Protected Series Compensation

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Aktuelle Begrenzertypen für Hochspannung (HV) - mit Supraleitern

SIEMENS

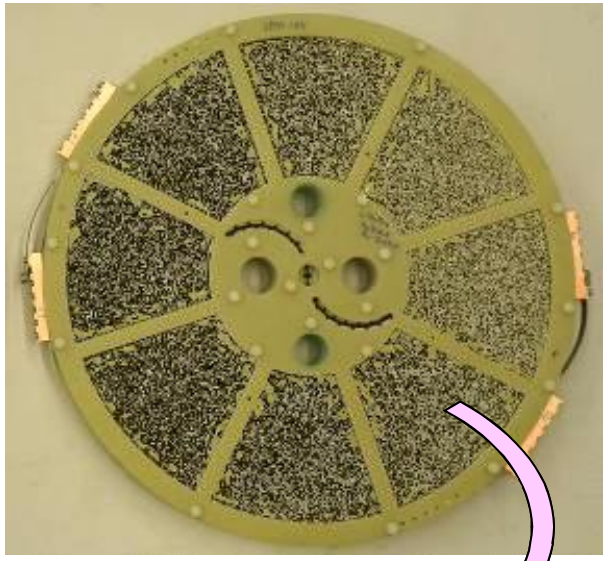
Bildnachweis:
- Siemens AG, AMSC und Nexans
- Innopower

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

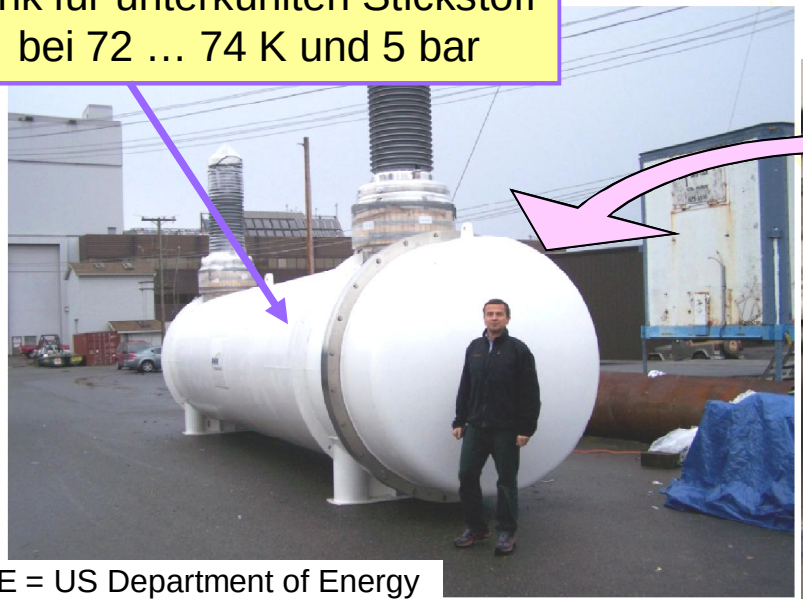
Aufbau einer elektrischen Phase des HV-SFCL, Beispiel aus einem DOE-Förderprojekt

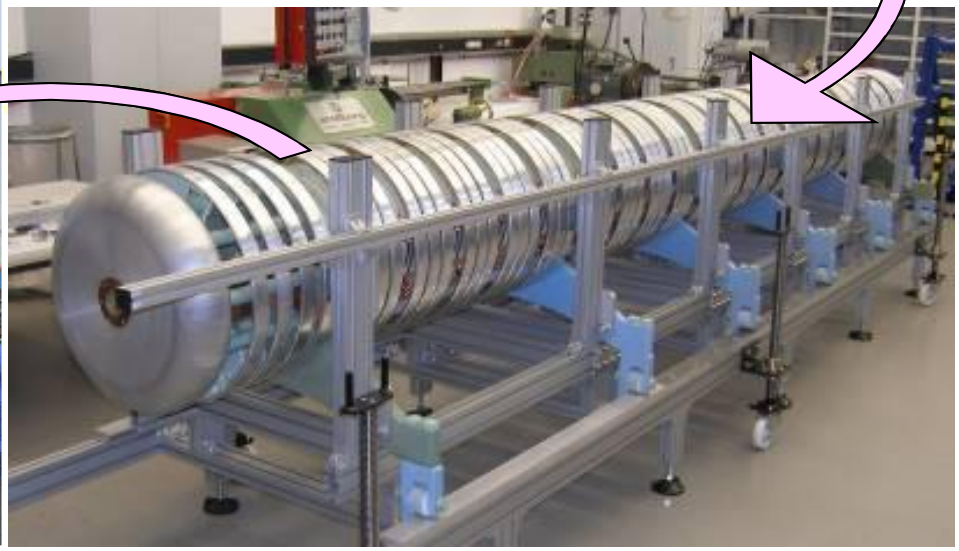
SIEMENS

- Schaltmodul aus 3 x 21 bifilaren Spulen
- Zwei parallele HTS-Bänder mit 27 m Länge pro Spule (3,4 km insgesamt für eine Phase)
- HTS-Bänder von AMSC mit ca. 250 A kritischem Strom bei 77 K, Edelstahllaminat und gewickelter Teflonisolierung



Tank für unterkühlten Stickstoff bei 72 … 74 K und 5 bar





DOE = US Department of Energy

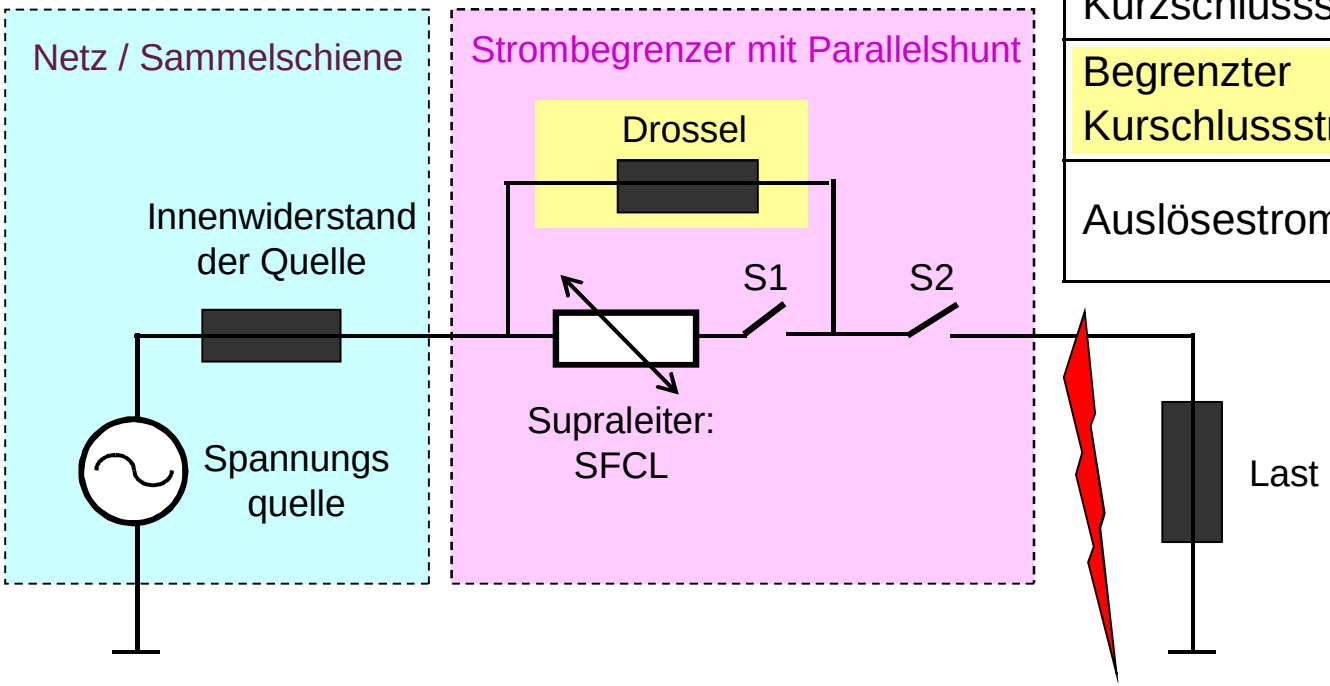
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Typische Spezifikation eines HV-SFCL mit paralleler Drossel am Beispiel DOE-Förderprojekt

SIEMENS

- Der begrenzte Strom wird durch die externe Drossel eingestellt.
- S1: Schneller Schalter, öffnet nach 3 bis 5 Halbwellen.
- S2: Einstellung der Begrenzungsdauer; schnelles Wiederzuschalten möglich.

Nennspannung	115 kV_{rms}
Höchste Spannung für Betriebsmittel	138 kV_{rms}
Nennstrom	1,200 A_{rms}
Größter prospektiver Kurzschlussstrom	63 kA_{rms}
Begrenzter Kurschlussstrom (I_k)	40 kA_{rms}
Auslösestrom	1.6 facher Nennstrom

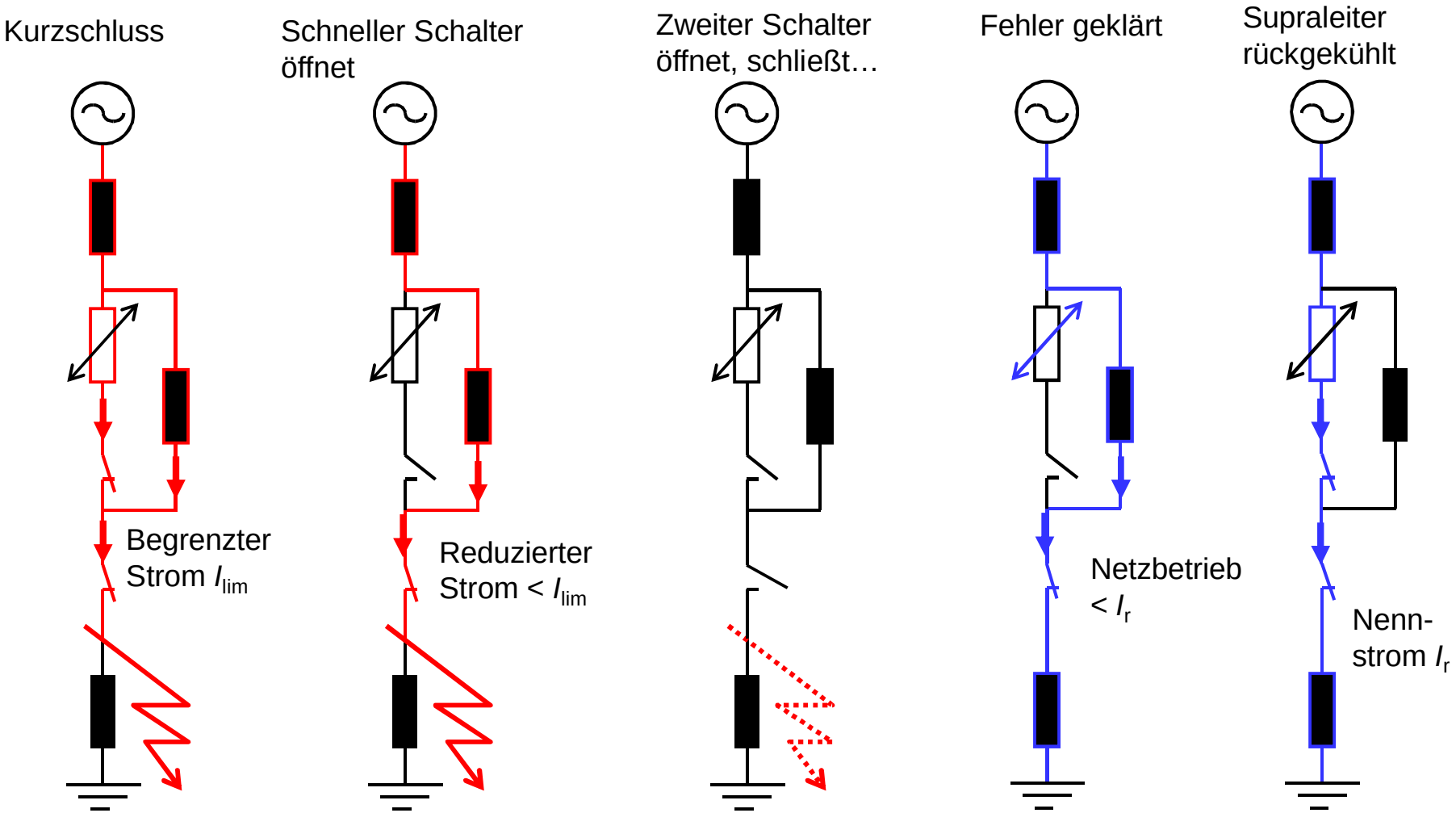


DOE = US Department of Energy

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Funktionsweise eines Begrenzers mit Parallelshunt

Schaltfolge nach einem Kurzschluss



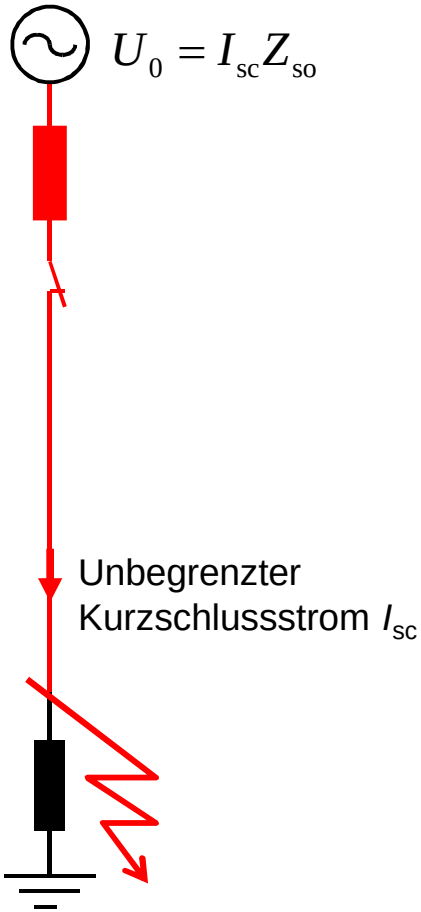
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Strombegrenzer mit Parallelshunt

Die Spannung am Supraleiter wird bei „schwacher Begrenzung“ deutlich reduziert .

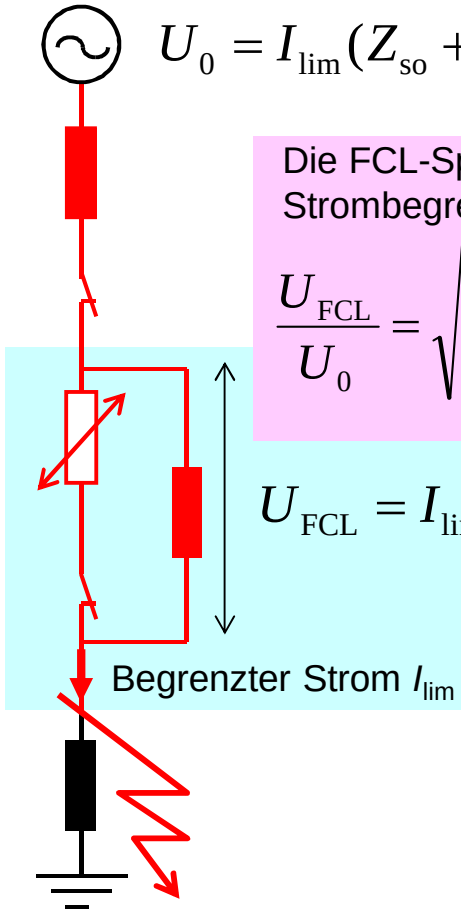
Kurzschluss ohne Begrenzer

$$U_0 = I_{sc} Z_{so}$$



Satter Kurzschluss mit Begrenzer

$$U_0 = I_{lim}(Z_{so} + Z_{lim})$$



Die FCL-Spannung wird durch das Strombegrenzungsverhältnis bestimmt:

$$\frac{U_{FCL}}{U_0} = \sqrt{\left(1 - \frac{I_{lim}}{I_{sc}}\right)^2 + 2\frac{I_{lim}}{I_{sc}}(1 - \cos\Delta\varphi)} \approx 1 - \frac{I_{lim}}{I_{sc}}$$

$$U_{FCL} = I_{lim} Z_{lim}$$

$$Z_{lim} = \frac{Z_{re} R_{FCL}}{Z_{re} + R_{FCL}}$$

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Materialparameter und Leitermenge

Der kritische Strom pro Breite (***I_c / w***) wird durch die supraleitenden Eigenschaften der YBCO Schicht bestimmt , d.h. die temperaturabhängige kritische Stromdichte j_c sowie die Schichtdicke:

$$\frac{I_c}{w} = j_c \cdot d_{YBCO}$$

Die Spannung pro Länge (***U / l***) hängt von den „normaleitenden“ Eigenschaften aller Schichten im Leiter- verbund ab, d.h. von der Leitfähigkeit , spezifischen Wärme und den Querschnitten der Lagen:

$$\frac{U}{l} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \cdot \int_{T_c}^{T_{\max}} \rho_{av} \cdot c_{av} \cdot dT}$$

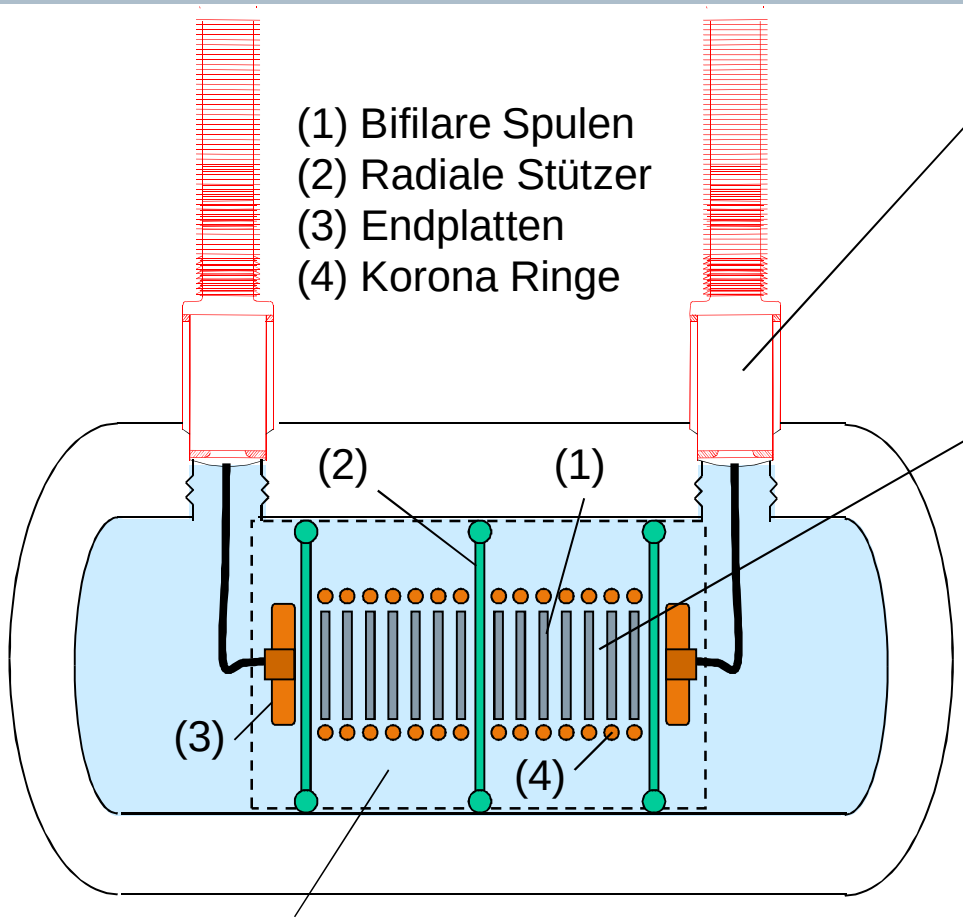
$$\rho_{av} = q \cdot \left(\sum_i \frac{q_i}{\rho_i} \right)^{-1}$$

$$c_{av} = \frac{1}{q} \cdot \sum_i (q_i \cdot c_i)$$

Zeit bis zum Abschalten	Δt	Lagenquerschnitt	q_i
Leitertemperatur beim Abschalten	T_{max}	Lagenwiderstand	ρ_i
Mittlere elektr. spez. Widerstand	ρ_{av}	Lagenspezifische Wärme	c_i
Mittlere spezifische Wärme	c_{av}		
Leiterquerschnitt	q		

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

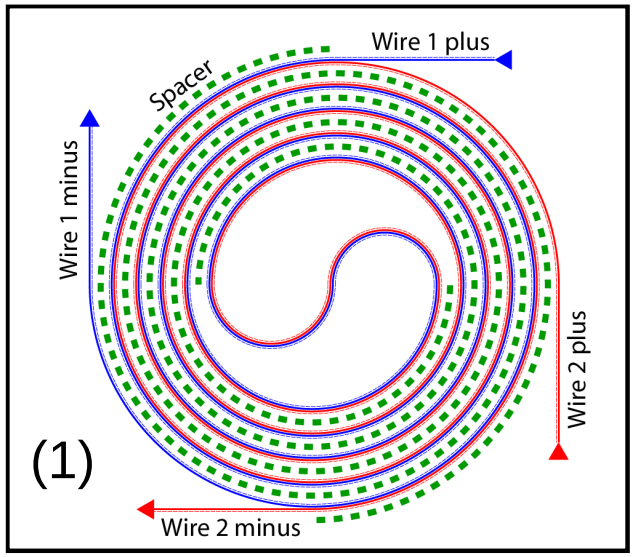
Wesentliche Komponenten eines HV-SFCL



Stromzuführungen,
im direkten Kontakt mit dem Kühlmedium,

Supraleitermodul aus HTS-Einzelspulen
mit Stützern, Koronaringen und Endplatten

Spannungsfestigkeit erfordert eine
Kühlung mit unterkühltem fl. Stickstoff:
3 bis 5 bar LN2 bei 72 … 74 K



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

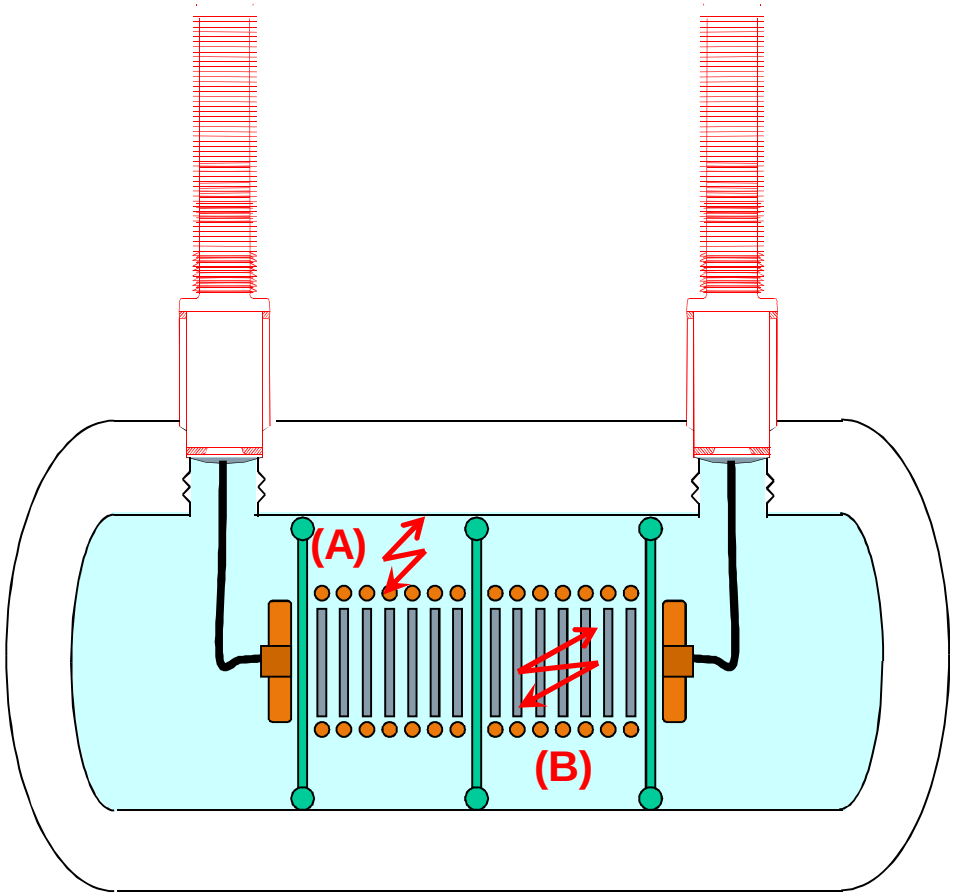
Auslegung der Isolation

Die Spannungsfestigkeit ist die zentrale Herausforderung beim Design eines HV-SFCL

Bei transienten Vorgängen im Netz können Überspannungen auftreten:

(A) zwischen Modul und Kryostatwand
(B) zwischen und innerhalb der Spulen

Die Auslegung der Isolation basiert auf der maximalen Prüfspannung für den Blitzstoßspannungstest
(als Beispiel 650 kV für 138 kV maximale Betriebsmittelspannung).



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Spannungsverteilung im Modul bei 650 kV Blitzstoßspannungsprüfung

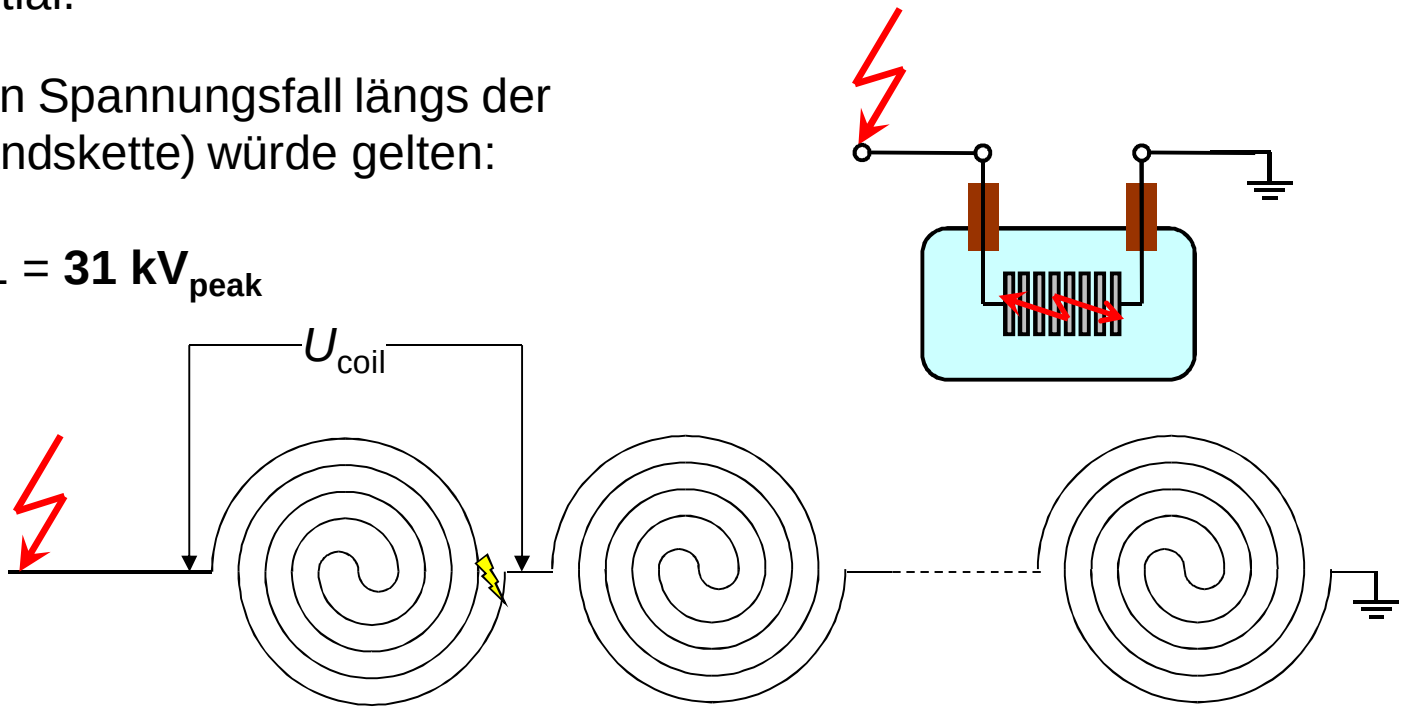
SIEMENS

Hohe elektrische Spannungen, insbesondere zwischen benachbarten Lagen einer “bifilaren” Wicklung, können durch folgende zwei Effekte entstehen:

(1) Ein zweiter Blitz trifft die Leitung kurz nach einem ersten Blitz, der einen Kurzschluss auslöste – eine Seite des Begrenzers ist dann geerdet die andere liegt auf hohem Potential.

Bei gleichförmigen Spannungsfall längs der Spulen (Widerstandskette) würde gelten:

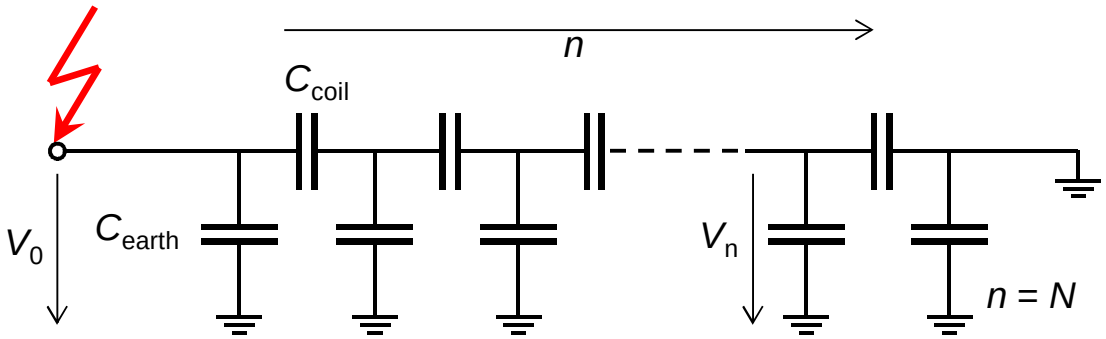
U_{coil} = 650 kV / 21 = **31 kV$_{peak}$**



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Spannungsverteilung im Module bei 650 kV Blitzstoßspannungsprüfung

Bei hohen Frequenzen und schnellen Spannungsrampen ist ein Ersatzschaltbild aus Kondensatoren die bessere Beschreibung:



$$V_n = V_0 \frac{\sinh(N-n)\alpha}{\sinh N\alpha}$$

$$\alpha = \sqrt{C_{\text{earth}} / C_{\text{coil}}}$$

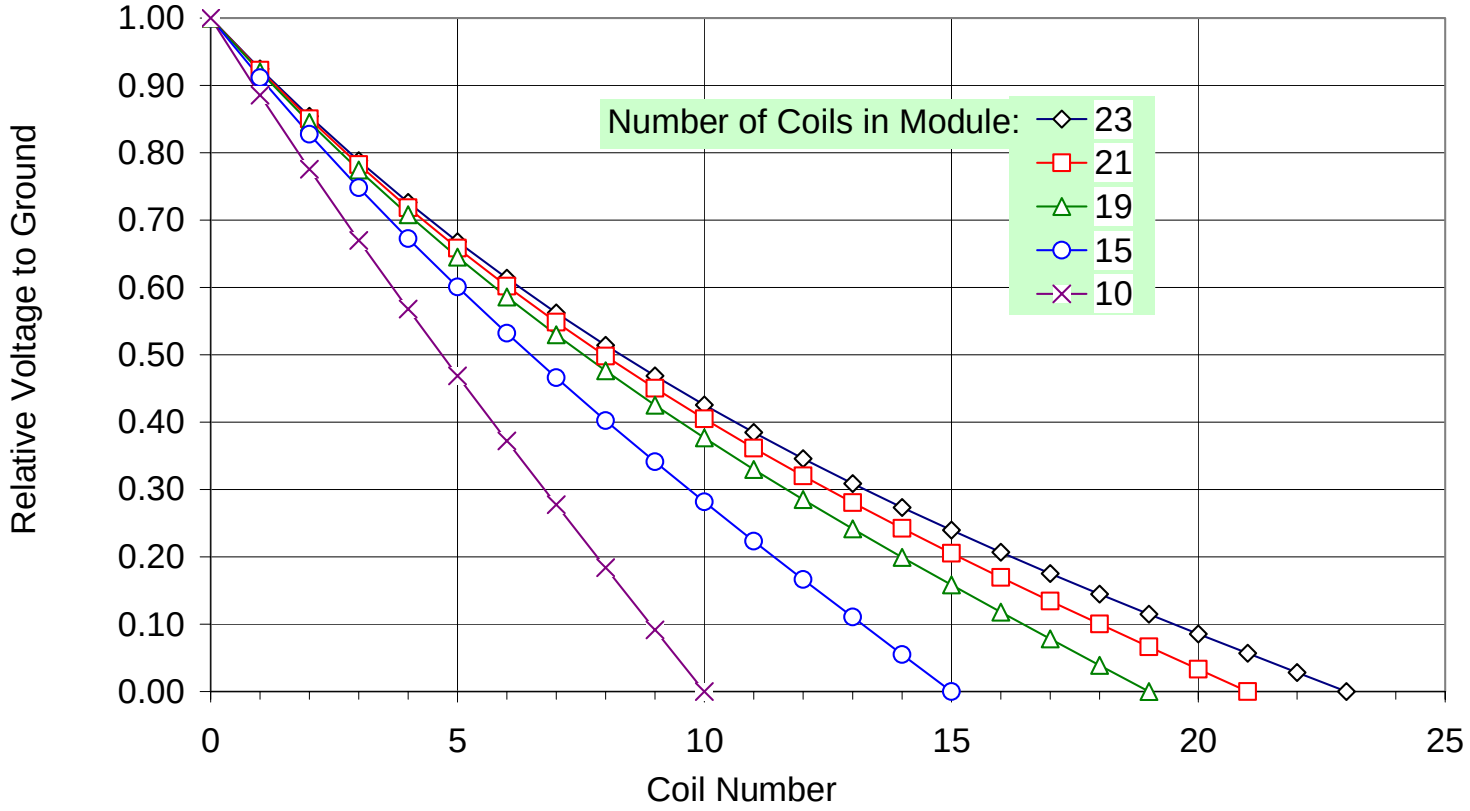
Spulenkapazität	C_{coil} = 531 pF
Kapazität gegen Erde	C_{earth} = 2.8 pF
	α = 0.073

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Spannungsverteilung im Module bei 650 kV Blitzstoßspannungsprüfung

SIEMENS

Verteilung der Spannung längs eines Kondensatornetzwerkes für unterschiedliche Spulenzahl.

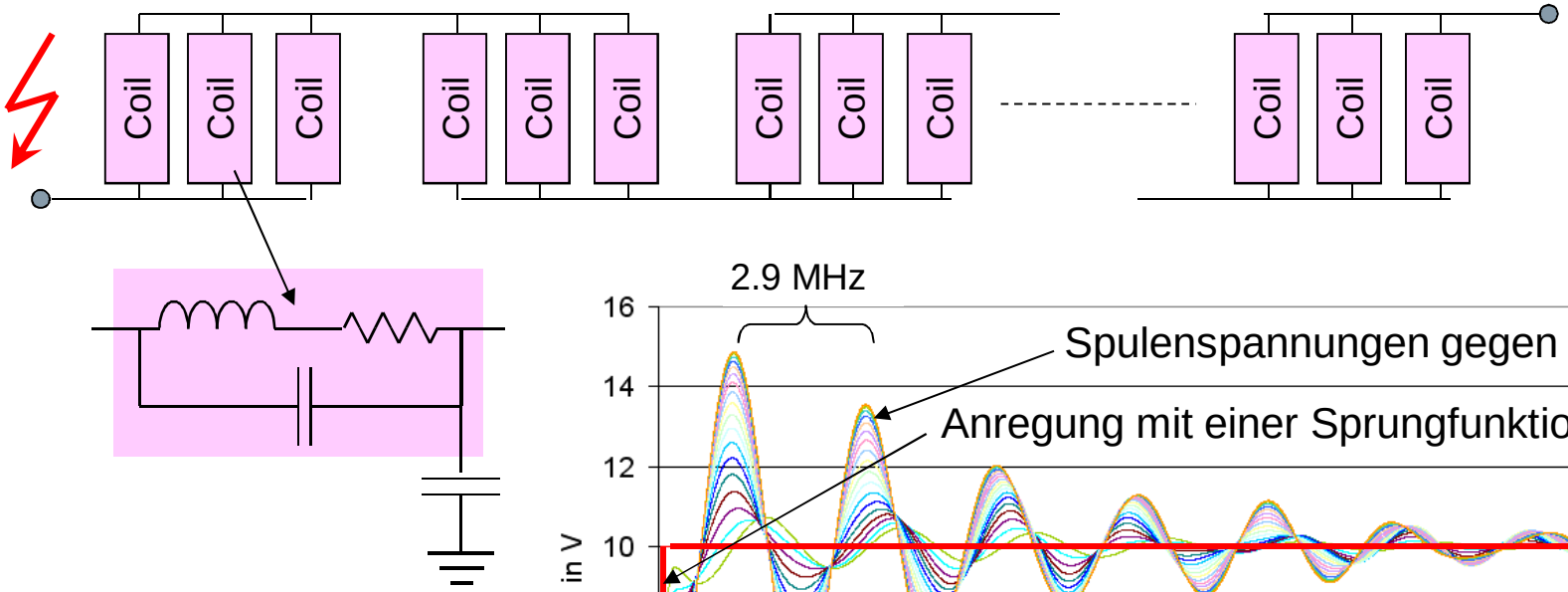


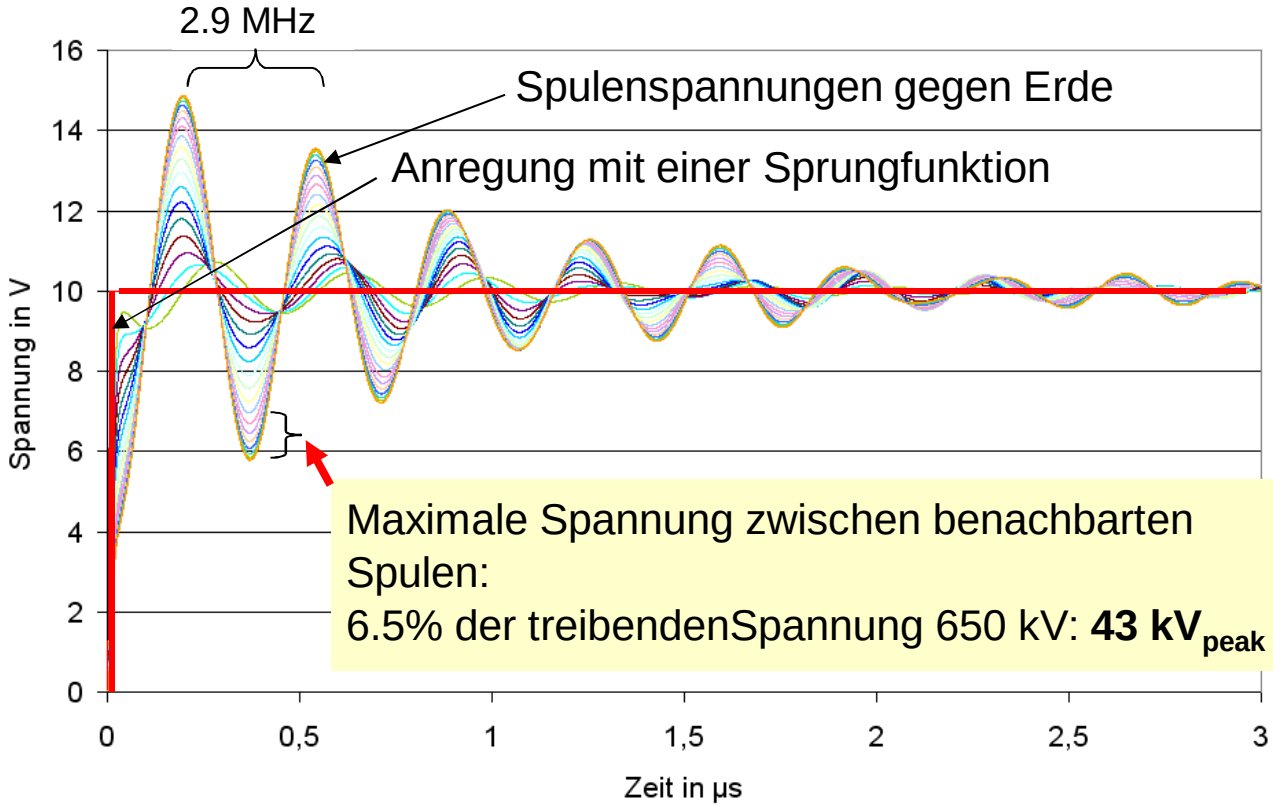
➡ Erhöhte Spannung an der ersten Spule:.

$U_0 - U_1$ = **50 kV$_{peak}$** für N = 21 statt 31 kV$_{peak}$ im Widerstandsnetzwerk

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Noch genaueres Ersatzschaltbild für ein SFCL Modul





Jede Spule wird durch eine Induktivität mit parallelem Kondensator und Kapazität gegen Erde dargestellt.

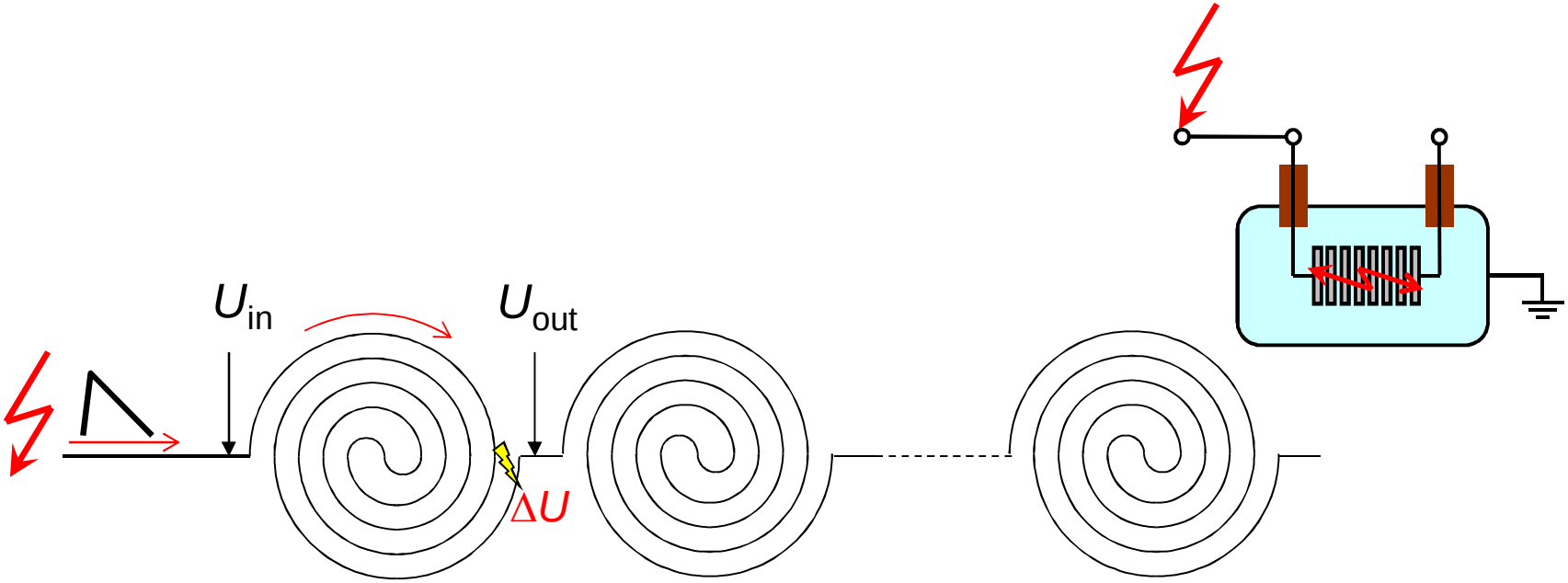
Kooperation mit der techn. Universität Braunschweig

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Spannungsverteilung im Modul bei 650 kV Blitzstoßspannungsprüfung

Hohe elektrische Spannungen, insbesondere zwischen benachbarten Lagen einer “bifilaren” Wicklung, können durch folgende zwei Effekte entstehen:

(2) Für sehr schnelle Spannungspulse (<0,1 µs) müssen Laufzeiteffekte längs des Leiters berücksichtigt werden. Überlagerung mit reflektierten Wellen können zu zusätzlicher Spannungsüberhöhung führen.



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

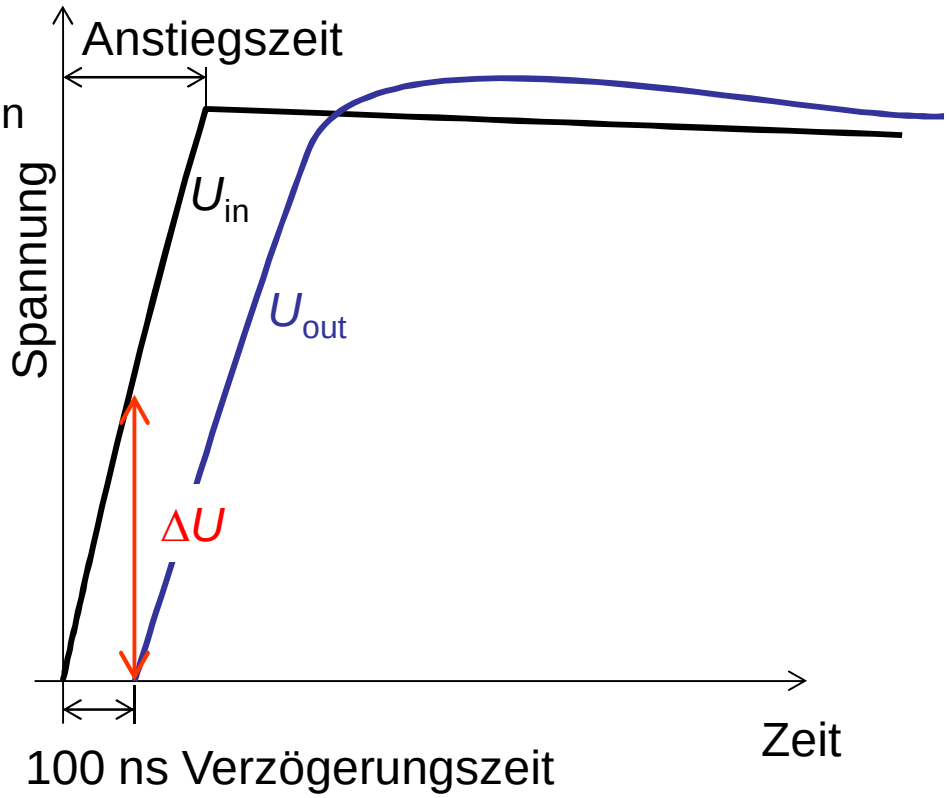
Spannungsdifferenz durch Wellenausbreitung

Worst case Abschätzung der maximalen Spannungsdifferenz nach M. Noe et.al. 2004:
Lightning pulses with rise time down to 100 ns can occur!

Wenn die gesamte Blitzstoßspannung von 650 kV_{peak} an der ersten Spule abfällt:

ΔU = 54 kV for 1.2 µs rise time

ΔU = 650 kV for $\leq$ 0.1 µs rise time

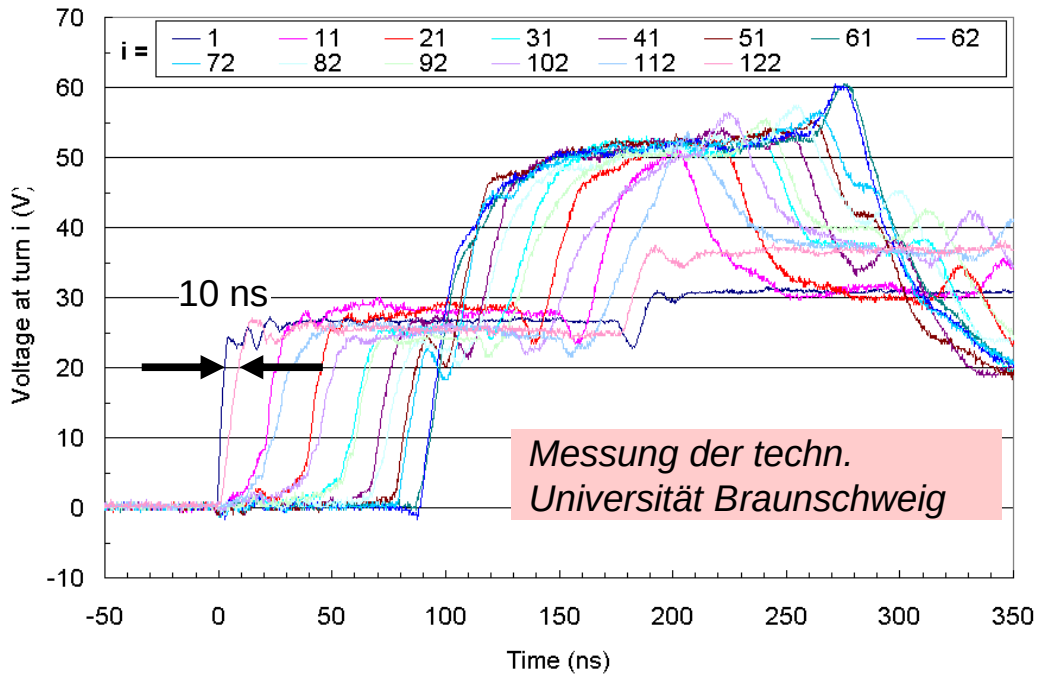


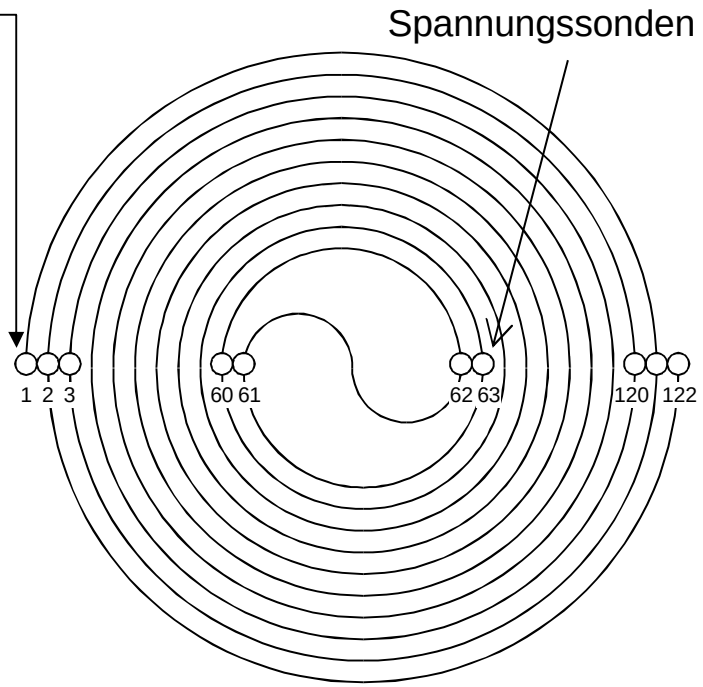
Spannung an den Enden einer bifilaren Spule bei Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit 3×10^8 m/s: **100 ns Verzögerungszeit** für 30 m Drahtlänge.

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Spannungsdifferenz durch Wellenausbreitung

Spannungsmessung an jeder Windung einer bifilaren Spule.
Anregung mit einem schnellen Niederspannungspuls.





Kapazitive Kopplung führt zu radialer Ausbreitung des Spannungspulses

Daher ist die Verzögerung der Anstiegzeit **< 10ns** anstatt 100ns

→ Damit wird die maximale Spannungsdifferenz um einen Faktor 10 reduziert.

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Fazit

Für einen 115-kV-SFCL konnten die Anforderungen an die Spannungsfestigkeit erfüllt werden - alle dielektrischen Prüfungen wurden bestanden.

Was ist die höchste Spannung für die ein HV-SFCL gebaut werden könnte?

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

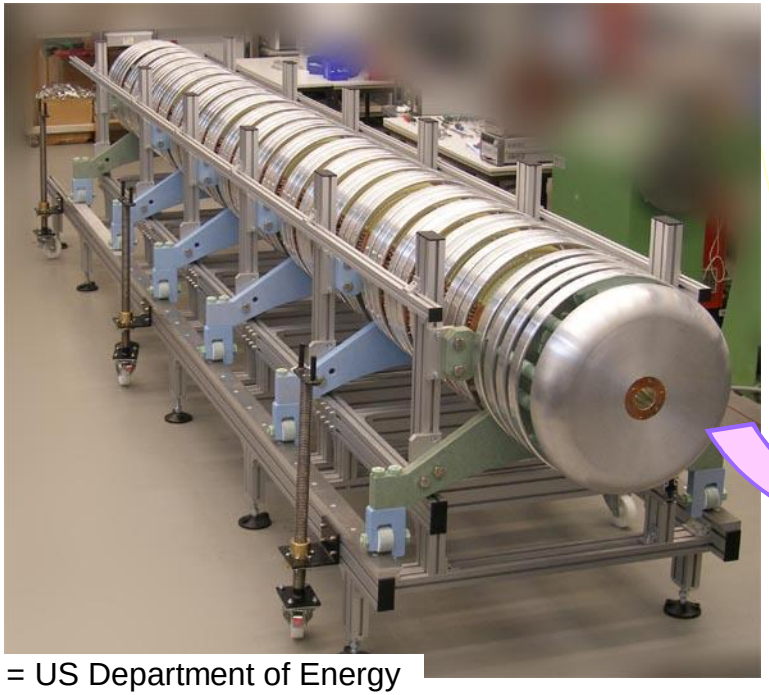
Ausblick

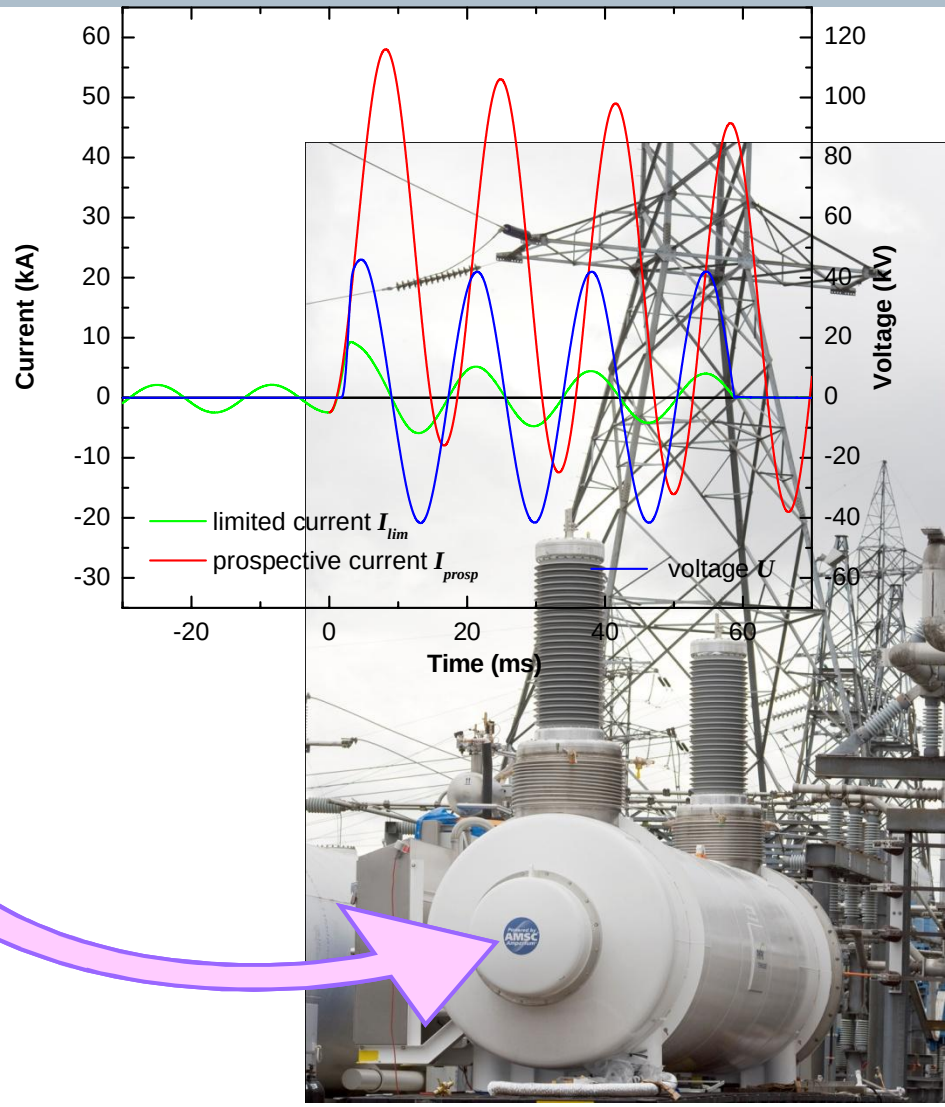
- Die Technologie der resistiven supraleitender Strombegrenzer ist durch viele weltweite Projekte abgesichert. Pilotanalgen für Mittelspannung sind installiert (Nexans).
- Bei der Hochspannung sind weitere Entwicklungsschritte im Bereich der Kryotechnik und der Spannungsfestigkeit in unterkühltem Stickstoff nötig. Eine Erhöhung der Betriebsmittelspannung auf 245 kV, möglicherweise 420 kV erscheint langfristig möglich.
- Die ständig steigende Kurzschlussleistung in dicht besiedelten Regionen, der Bedarf an hoher "Spannungsqualität" und die zunehmende dezentrale Einspeisung werden die weitere Entwicklung supraleitender Begrenzer vorantreiben.
- Weitergehende Einbindung von Energieversorgern sowie Herstellern von Leitern und Kryosystemen ist notwendig:
  - zum Nachweis des Kundennutzens von Strombegrenzern.
  - zur Weiterentwicklung zuverlässiger und wartungsarmer Kryo- und Kälteanlagen.
  - zur Reduktion des Leiterpreises auf deutlich unter 100 EUR / (kA m)

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Supraleitender Kurzschlussstrombegrenzer - eine neuartige Netzkomponente

- Einphasiger Demonstrator für Hochspannung gebaut und geprüft.
- Technologie der resistiven Schaltmodule einsatzbereit für Pilotprojekte.





DOE = US Department of Energy

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved