



Schaltüberspannung in Schaltanlagen der Übertragungs- und Verteilnetze

... eine kurze Einführung

Uwe Schmidt

Ilmenau, 28.3.2017

oo Inhalt

Spannungsbelastungen

Klassifizierung

Zeitweilige Überspannungen - Exkurs

Schaltüberspannungen

Fehlereintritt

Schalten induktiver Ströme

Schalten kapazitiver Ströme

Schalten von Kurzschlüssen

Richtwerte für Überspannungsfaktoren





01 Spannungsbelastungen im Netz

Unterteilung

- Betriebsspannung U_B entspricht einer betriebsfrequenten Dauerspannung
- Zeitweilige betriebsfrequente Überspannungen
- Schaltüberspannungen als Folge von Zustandsänderungen im Netz
- Blitzüberspannungen als Folge von atmosphärischen Einwirkungen



01 Spannungsbelastungen im Netz

Definitionen

Höchste Betriebsspannung U_s des Netzes:

Höchster Wert der Betriebsspannung an einem beliebigen Punkt des Netzes, gemessen zwischen den Außenleitern (Effektivwert) bei Normalbetrieb.

Höchste Spannung U_m für Betriebsmittel:

Effektivwert der höchsten Außenleiterspannung, für die ein Betriebsmittel im Hinblick auf seine Isolation und andere Eigenschaften, . . . , bemessen ist.

Überspannung:

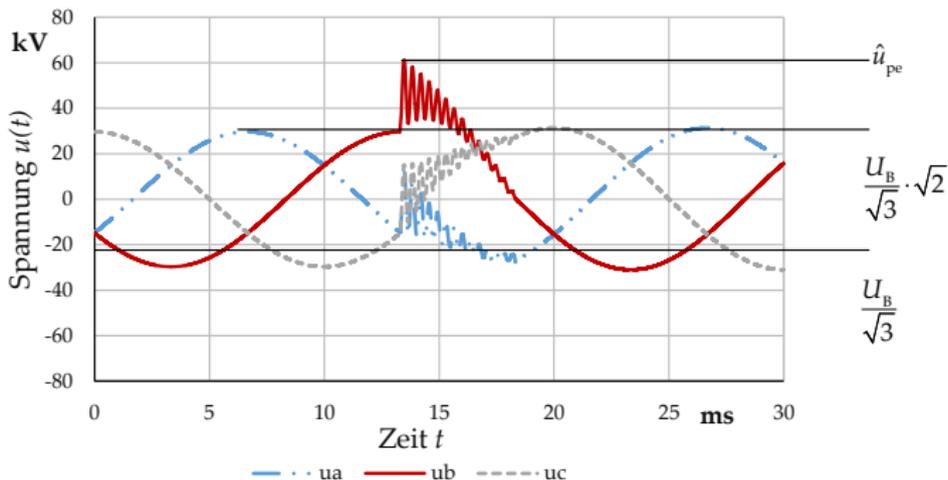
Spannung zwischen einem Außenleiteranschluss und Erde oder in einer Längsanordnung mit einem Scheitelwert höher als die Höchste Betriebsspannung des Netzes U_s geteilt durch $\sqrt{3}$.

Nennspannung U_n eines Netzes:

Ein geeigneter, gerundeter Spannungswert (Effektivwert) zwischen den Außenleitern zur Bezeichnung oder Identifizierung des Netzes.

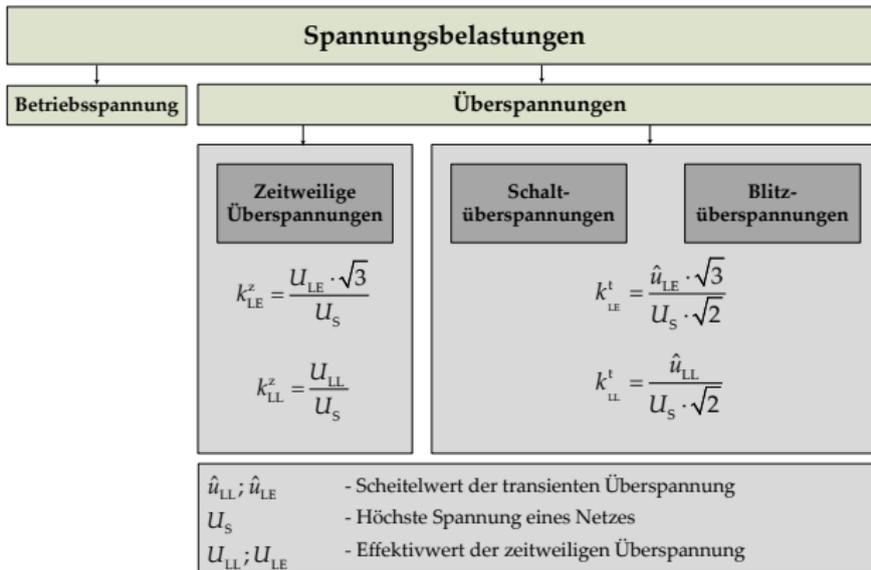
01 Spannungsbelastungen im Netz

Definitionen - Am Beispiel Leiter-Erde-Spannungen

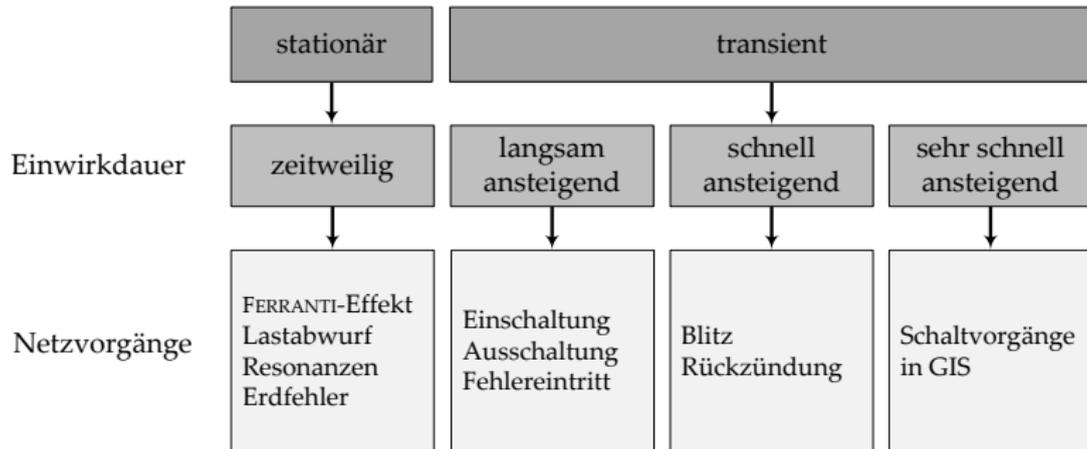


01 Spannungsbelastungen im Netz

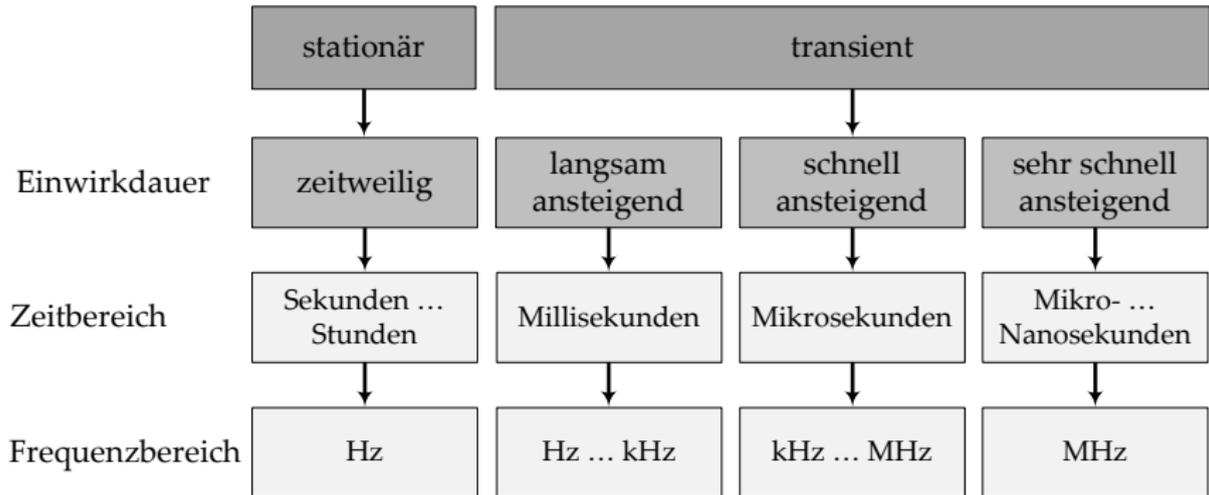
Überspannungsfaktor k



02 Klassifizierung Einwirkdauer & Ursache



02 Klassifizierung Einwirkdauer & Frequenzanteile





02 Klassifizierung

Ursachen & Folgen

Ursachen

Schalthandlungen:

- Betriebsschaltungen
- Fehlschaltungen

Fehler

- Alterung
- äußerer Eingriff
- äußere Überspannung
- innere Überspannung

Folge

Spannungsüberhöhungen

- Entlastung von Transformatoren/Generatoren
- Ferranti-Effekt
- Resonanzen
- Erd-Unsymmetrien

Überspannungen

- Schaltüberspannungen
- Einschwing-Überspannungen
- Fehlerüberspannungen
- Resonanzen

03 Zeitweilige Überspannungen

Entlastung von Transformatoren

Spannung auf der Sekundärseite des Transformators:

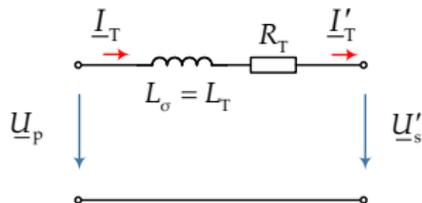
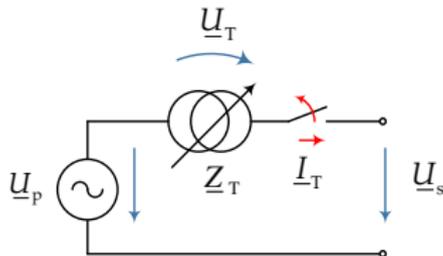
$$\underline{U}_s = \frac{\underline{U}_p}{k_g} + \underline{U}_T$$

$$\underline{U}_T = \underline{Z}_T \cdot \underline{I}_T$$

Spannung nach der Entlastung:

$$\underline{U}_s = \frac{\underline{U}_p}{k_g}$$

$$\Delta U_s = U_T$$



03 Zeitweilige Überspannungen

Ferranti-Effekt

Kraftwerk

Netz



U_A

Freileitung

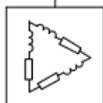


Transformator



U_E

Last



- wenig ausgedehnte Netze:

$$k_{LE}^z \leq 1,2$$

- ausgedehnte Netze:

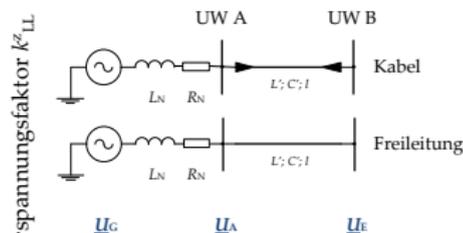
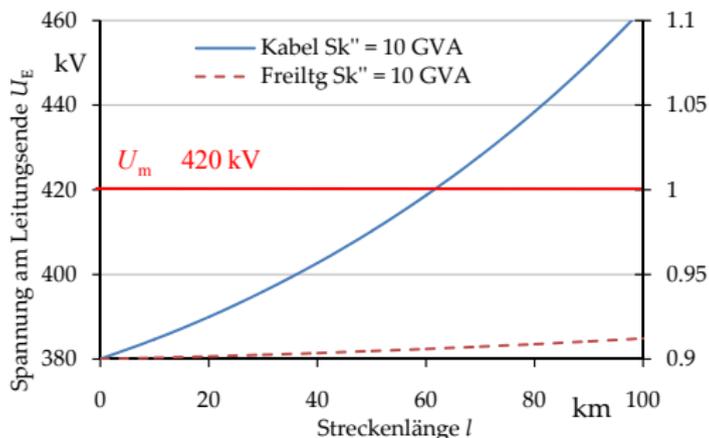
$$k_{LE}^z \leq 1,5$$

- Maschinentrafo:

$$k_{LE}^z \leq 1,5$$

03 Zeitweilige Überspannungen

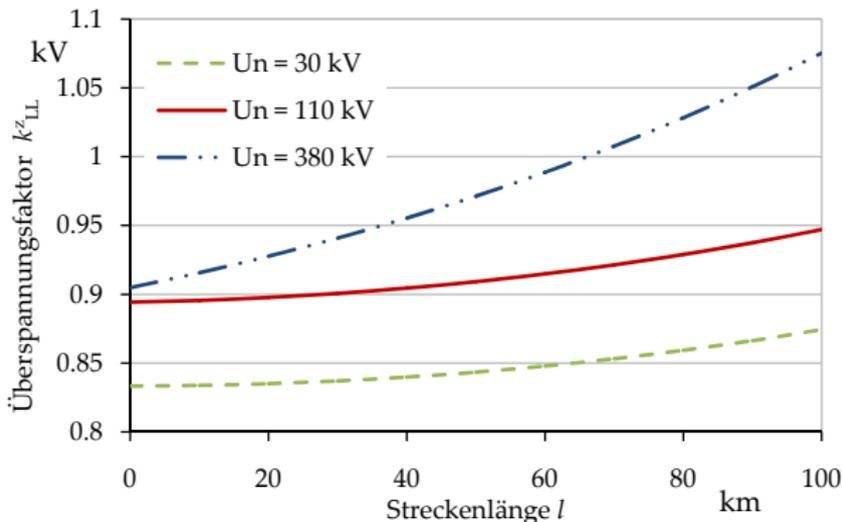
Ferranti-Effekt



Spannung U_E am Leitungsende in Abhängigkeit der Systemlänge ($U_A = 380$ kV)

03 Zeitweilige Überspannungen

Ferranti-Effekt



Spannung U_E am Leitungsende in Abhängigkeit der Nennspannung ($U_n = 380$ kV) (VPE-Kabel)



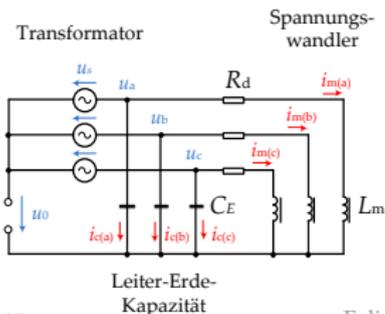
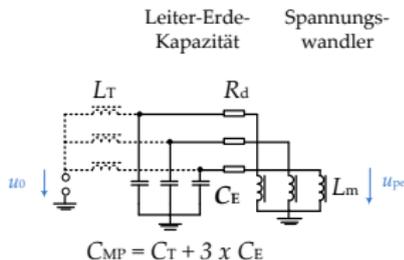
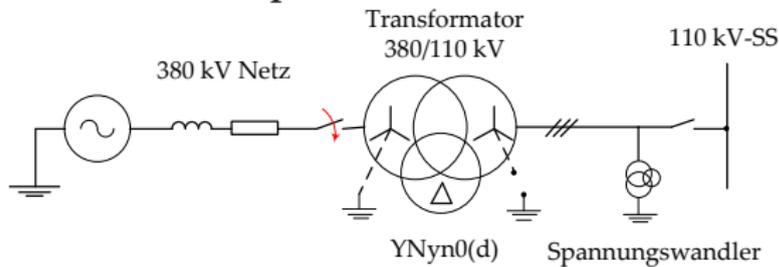
03 Zeitweilige Überspannungen

Ferroresonanzen

- Große Induktivitäten:
 - nichtlineare U-I-Kennlinie
 - Eisenkern
- Kleines Teilnetz mit isoliertem Sternpunkt:
 - große Induktivitäten
 - kleine Kapazitäten
- Eigenfrequenz des Teilnetzes kleiner als Netz-Nennfrequenz f_n
- Anregung der subharmonischen Schwingung durch Schaltvorgang/Erdschluss
- Geringe Dämpfung im schwingenden System

03 Zeitweilige Überspannungen

Ferroresonanzen - Beispiel: leerlaufendes Trafo-Schaltfeld





03 Zeitweilige Überspannungen

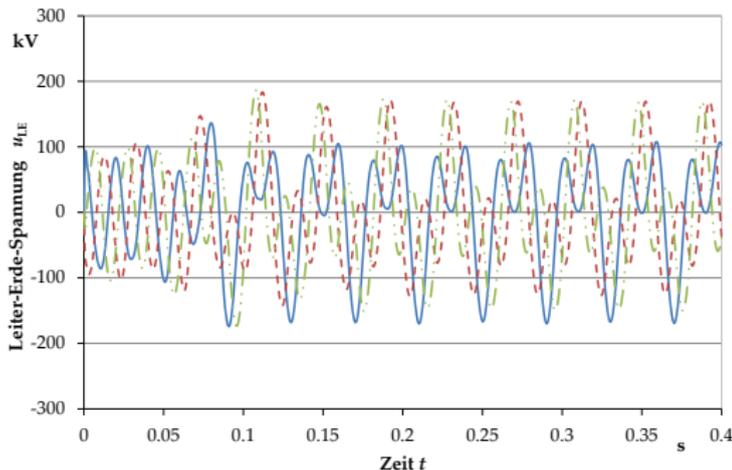
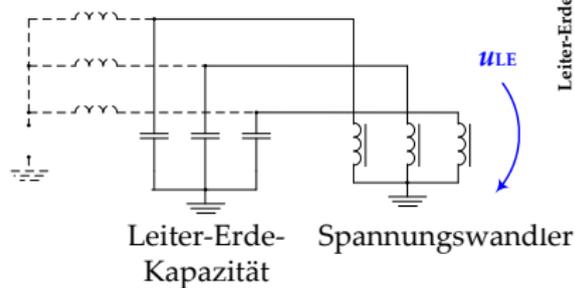
Ferroresonanzen



03 Zeitweilige Überspannungen

Ferroresonanzen - Leiter-Erde-Spannung u_{LE}

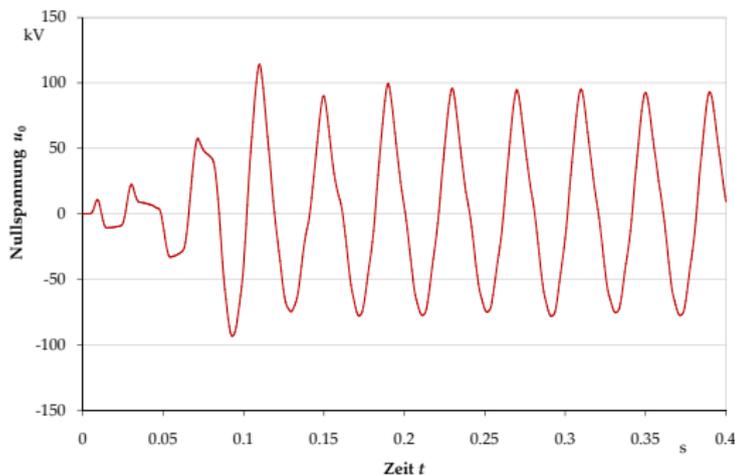
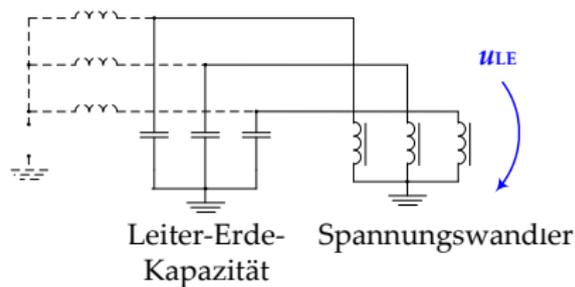
Transformator



03 Zeitweilige Überspannungen

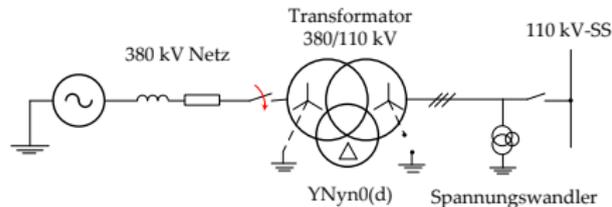
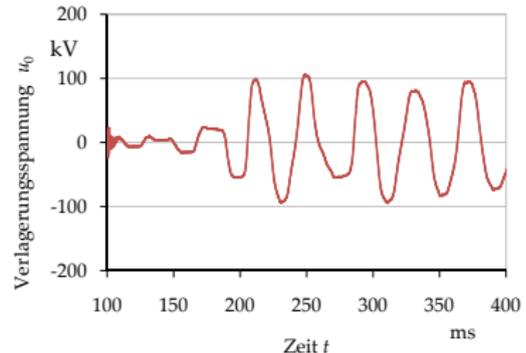
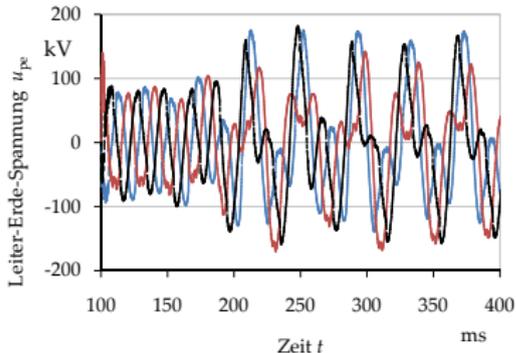
Ferroresonanzen - Nullspannung u_0

Transformator



03 Zeitweilige Überspannungen

Ferroresonanzen - Messung 110 kV-Trafoschaltfeld



03 Zeitweilige Überspannungen

Ferroresonanzen - subharmonische Schwingungen

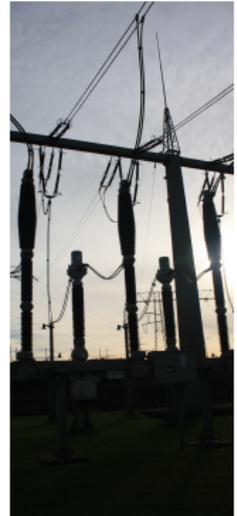
1. Subharmonische Schwingungen treten in kleinen Teilnetzen mit isoliertem Sternpunkt auf. Häufiger Fall ist das leer laufende Transformator-Schaltfeld.
 - kleine Nullkapazität
 - sehr große Induktivität (z. Bsp.: Spannungswandler)
2. Subharmonische Schwingungen bleiben i. d. R. auf das Nullsystem beschränkt. Die Leiter-Erde-Spannungen können dabei deutlich über den Bemessungswerten der Betriebsmittel und vor allem der Überspannungsableiter liegen. Deshalb sind diese unbedingt zu vermeiden (z. Bsp.: Bedämpfung, Schaltprozedur).
3. Überspannungsableiter sind nicht geeignet, Überspannungen als Folge subharmonischer Schwingungen zu begrenzen. Zeitweilige Überspannungen oberhalb der Bemessungsgrößen (50 Hz) können zur Zerstörung des Ableiters führen!



04 Schaltüberspannungen

Ursachen

- Überspannungen bei Erd-/Erdkurzschluss
- Überspannungen bei Unterbrechung kleiner induktiver Ströme
- Überspannungen bei Unterbrechung kapazitiver Ströme
- Überspannungen bei Einschaltung von Transformatoren
- Überspannungen bei Einschaltung von Leitungen
- Einschwingspannungen über Schaltstrecken von LS



04 Fehlereintritt

Beschreibung der Überspannungen

- Entladevorgang der fehlerbehafteten Phase
- Aufladevorgang der fehlerfreien Phasen
- Spulen-Ausgleichsvorgang

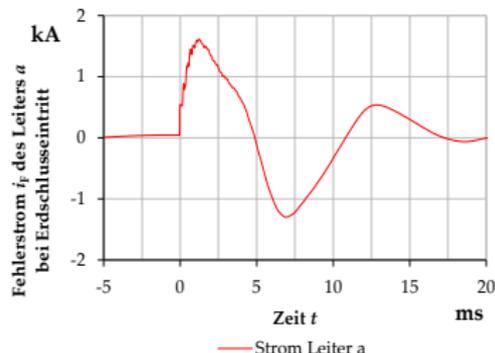
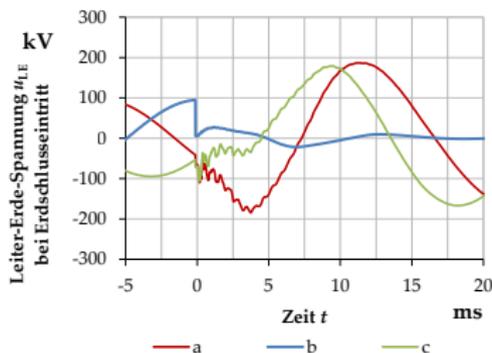


Abb: Leiter-Erde-Spannungen und Fehlerstrom bei Erdschluss im 110-kV-Netz

04 Fehlereintritt

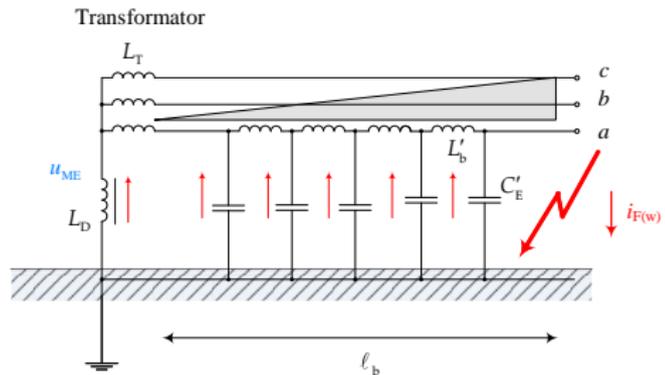
Erdschlusseintritt - Entladevorgang der fehlerbehafteten Phase

- Frequenz abhängig von Länge der Leitung und der Wellengeschwindigkeit:

$$f_{e(w)} = \frac{v_w}{4 \cdot \ell_b}$$

- Scheitelwert des Entladestromes:

$$\hat{i}_{F(w)} = \frac{\hat{i}_{CE(\ell)}}{3} \cdot \frac{f_{e(w)}}{f_n}$$



04 Fehlereintritt

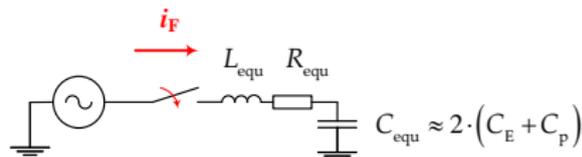
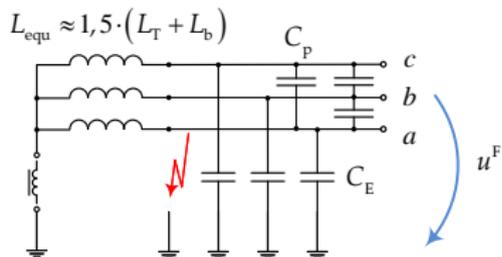
Erdschlusseintritt - Aufladevorgang der fehlerfreien Phasen

- Aufladung auf das $\sqrt{3}$ -fache der Leiter-Erde-Spannung
- Überspannungsfaktor:

$$k_{LE}^t = 1 + 2 \cdot 0,72 \approx \underline{\underline{2,5}}$$

- Scheitelwert der Überspannung im 110-kV-Netz:

$$\hat{u}_{LE}^F \approx 2,5 \cdot \frac{123 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = \underline{\underline{251 \text{ kV}}}$$



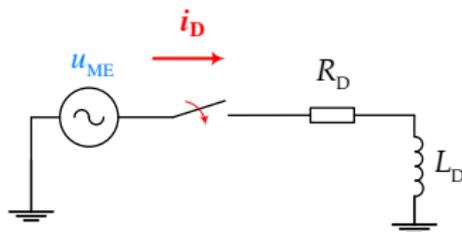
04 Fehlereintritt

Erdschlusseintritt - Spulen-Ausgleichsvorgang

- Einschaltung einer Induktivität
- Zeitkonstante:

$$\tau = \frac{L_D}{R_D}$$

- Fehlereintritt in der Nähe Spannungsmaximum
- Überspannungen können in der Regel vernachlässigt werden



04 Fehlereintritt

Erdschlusseintritt - Intermittierender Erdschluss

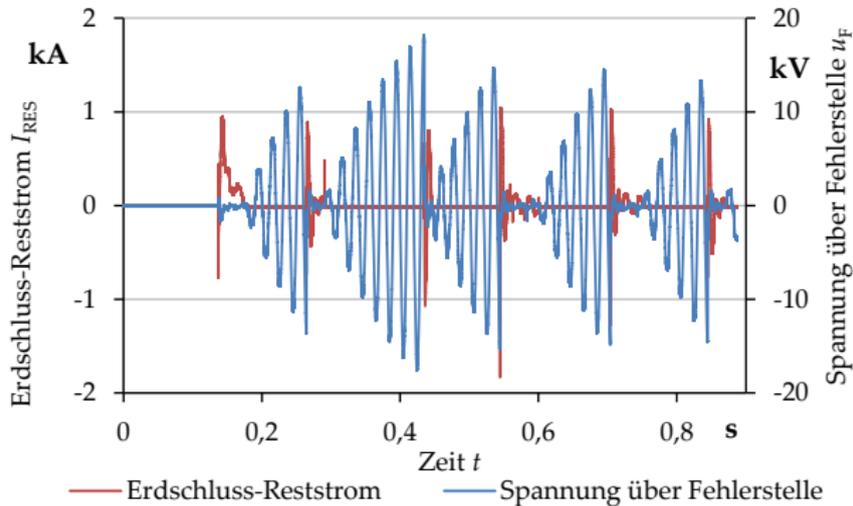


Abb: Intermittierender Erdschluss im 20-kV-Netz; $I_{CE} \approx 1000$ A

04 Fehlereintritt

Erdschluss

1. Überspannungen bei Fehlereintritt in Netzen mit Resonanz- oder isolierter Sternpunktterdung resultieren aus der Aufladung der fehlerfreien benachbarten Phasen auf den $\sqrt{3}$ -fachen Wert der Leiter-Erde-Spannung.
2. Die Aufladung führt zu Schwingungen über den Induktivitäten und Kapazitäten des Netzes.
3. Der maximale Überspannungsfaktor beträgt $k_{LE(\max)}^t = 2,5$.
4. Intermittierende Erdschlüsse führen zu sich wiederholenden Aufladevorgängen und damit zu andauernden Einwirkungen von Überspannungen.

04 Schalten induktiver Ströme

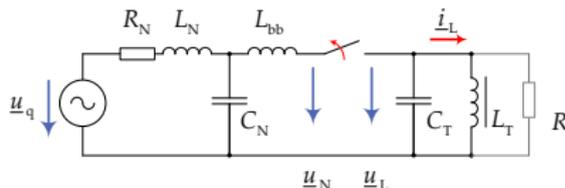
Allgemeine Beschreibung der Überspannung

- Spannung über der Induktivität:

$$u_L = L_T \cdot \frac{di_L}{dt}$$

- Frequenz des Ausgleichsvorganges:

$$f_{e(T)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T \cdot C_T}}$$



04 Schalten induktiver Ströme

Allgemeine Beschreibung der Überspannung

- Energie im geschalteten Kreis bei Stromabriss:

$$W_a = W_T + W_C$$

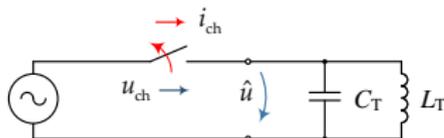
$$W_a = \frac{L_T}{2} \cdot i_{\text{ch}}^2 + \frac{C_T}{2} \cdot u_{\text{ch}}^2$$

- Energie über Kapazität:

$$W_C = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \hat{u}^2$$

- Höchster Wert der Überspannung:

$$\hat{u} = \sqrt{\frac{L_T}{C_T} \cdot i_{\text{ch}}^2 + u_{\text{ch}}^2}$$



04 Schalten induktiver Ströme Schalten einer Kompensationsdrossel



Kompensationsdrossel der 50Hertz Transmission GmbH

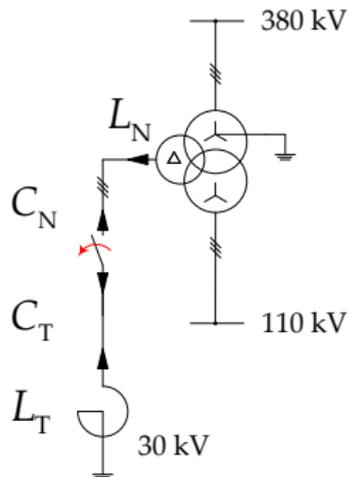
04 Schalten induktiver Ströme Beanspruchung des Leistungsschalters

- Ausgleichsvorgänge auf Netz- und Drosselseite
- Eigenfrequenz Drosselseite $f_{e(T)}$:

$$f_{e(T)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_T \cdot C_T}}$$

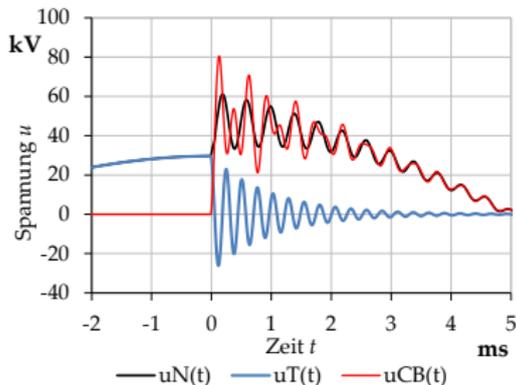
- Eigenfrequenz Netzseite $f_{e(N)}$:

$$f_{e(N)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{\frac{L_T}{2} \cdot (3 \cdot C_N + 2 \cdot C_T)}}$$



04 Schalten induktiver Ströme Beanspruchung des Leistungsschalters

- Beispiel:
 $U_n = 33 \text{ kV}$
 $Q_L = 45 \text{ Mvar}$
 $\ell_c = 100/100 \text{ m}$ (Kabellängen)
- Eigenfrequenzen:
 $f_{e(T)} \approx 3,3 \text{ kHz}$
 $f_{e(N)} \approx 2,0 \text{ kHz}$

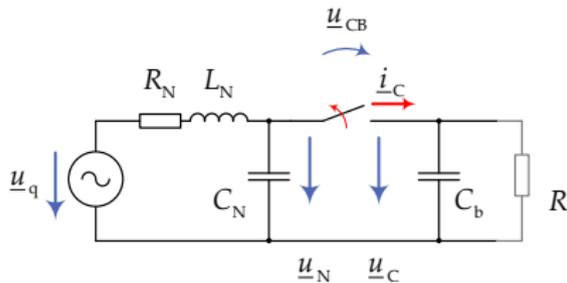


04 Schalten induktiver Ströme

Beanspruchung des Leistungsschalters

1. Die Abschaltung großer Induktivitäten ohne Wiederzündungen erfolgt i.d.R. ohne Generierung kritischer Überspannungen.
2. Bei Abschaltung treten jeweils voneinander unabhängige Ausgleichsvorgänge im abgeschalteten Teilnetz (Reaktorseite) und im speisenden Netz (Netz-/Transformatorseite) auf. Die Überlagerung der Ausgleichsvorgänge mit verschiedenen Frequenzen führt zu Einschwingspannungen über dem Leistungsschalter.
3. Die Steilheit der Einschwingspannung über dem Leistungsschalter kann zu Wiederzündungen (Re-ignitions) der Schaltstrecke und damit zu hohen Überspannungen über den angeschlossenen Betriebsmitteln führen.
4. Überspannungsschutzmaßnahmen können sein:
 - Installation von Überspannungsableitern
 - Installation zusätzlicher Kapazitäten (bzw. RC-Kombinationen)
 - Verwendung geeigneter Leistungsschalter (z. Bsp.: höhere Nennspannung des LS).

04 Schalten kapazitiver Ströme Ausschaltung von Freileitungen und Kabeln



Teilvorgänge:

- Ausgleichsvorgang des Netzes

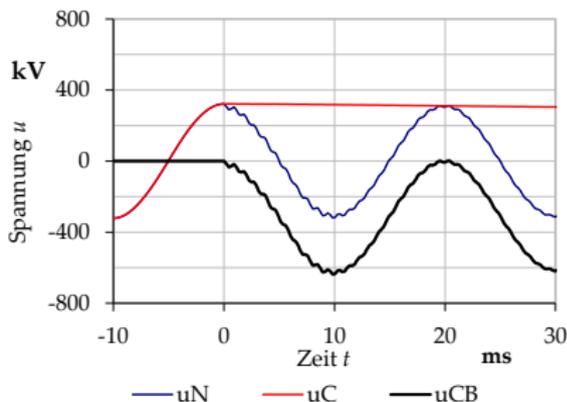
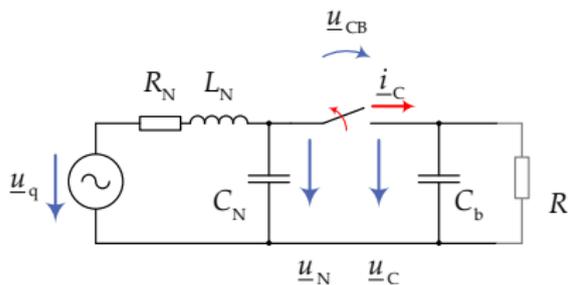
$$f_{e(N)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_N \cdot C_N}}$$

- hohe Einschwingspannung über dem Leistungsschalter

$$\hat{u}_{cb} \approx 2 \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}$$

04 Schalten kapazitiver Ströme Ausschaltung von Freileitungen und Kabeln

Normale Ausschaltung $t = 0$ ms
(keine Wieder-/Rückzündung)



04 Schalten kapazitiver Ströme

Ausschaltung von Freileitungen und Kabeln

Rückzündung nach $t = 10 \text{ ms}$
(keine Lichtbogenlöschung)

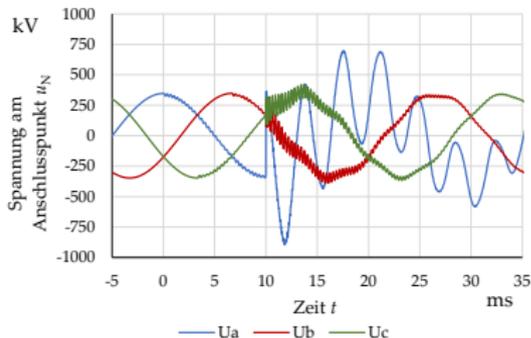
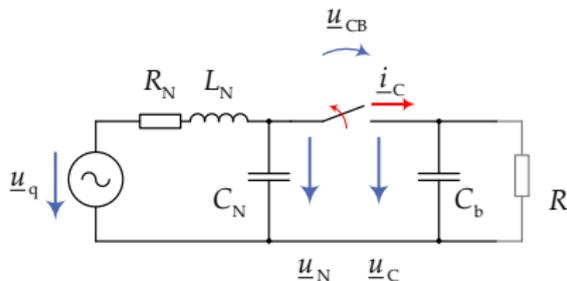


Abb: Netzseitige Spannungen bei Abschaltung ($t = 0,0 \text{ s}$) einer 380-kV-Leitung, Rückzündung (Restrike) (Leiter a); $k_{LE}^t \approx 2,7$

04 Schalten kapazitiver Ströme

Ausschaltung von Freileitungen und Kabeln

Rückzündung nach $t = 10 \text{ ms}$

(Lichtbogenlöschung im Nulldurchgang $t = 12,5 \text{ ms}$)

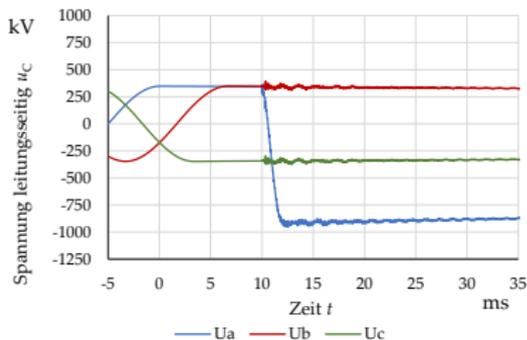
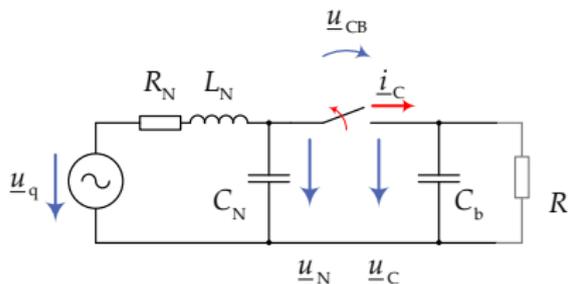


Abb: Leitungsseitige Spannungen bei Abschaltung einer 380-kV-Leitung, Rückzündung; $k_{LE}^t \approx 2,7$



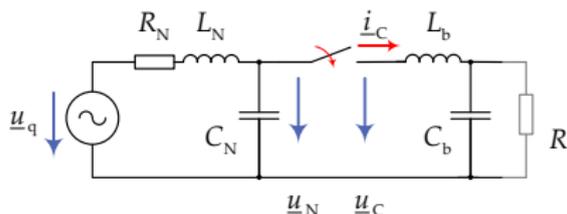
04 Schalten kapazitiver Ströme

Ausschaltung von Freileitungen und Kabeln

1. Die Abschaltung großer Kapazitäten erfolgt i.d.R. „weich“ und ohne Generierung kritischer Überspannungen.
2. Nach erfolgter Lichtbogenlöschung wird 10 ms nach Strom-Nulldurchgang eine Spannung $2 \cdot U_B / \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$ wirksam.
3. Rückzündungen führen zu einer Umladung der Kapazität auf $2 \cdot U_B / \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$. Die Spannungseskalation über der Kapazität als Folge mehrerer Rückzündung führt gegebenenfalls zur Zerstörung des Schalters.

04 Schalten kapazitiver Ströme

Einschaltung von Freileitungen und Kabeln



Teilvorgänge:

- Wanderwellen-Ausgleichsvorgang

$$f_{e(w)} = \frac{v_w}{4 \cdot l_b}$$

- Ausgleichsvorgang des Netzes

$$f_{e(N)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{(L_N + L_b) \cdot (C_N + C_b)}}$$

- Ferranti-Effekt

04 Schalten kapazitiver Ströme

Einschaltung von Freileitungen und Kabeln

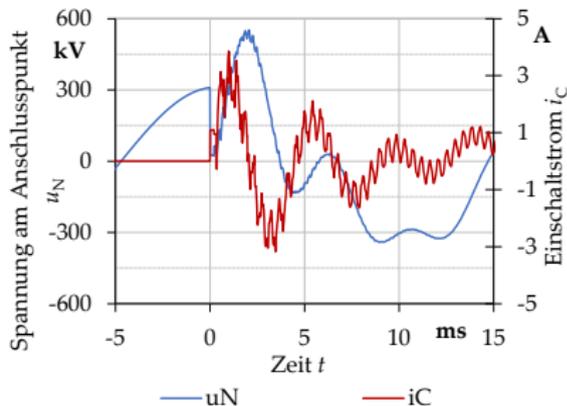
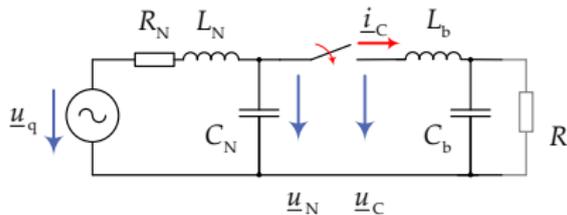


Abb: Einschaltung einer 380-kV-Leitung mit Kabel-Freileitungsanteil;
Strom/Spannung am Leitungsanfang: $k_{LE}^t \approx 1,9$

04 Schalten kapazitiver Ströme Einschaltung von Freileitungen und Kabeln

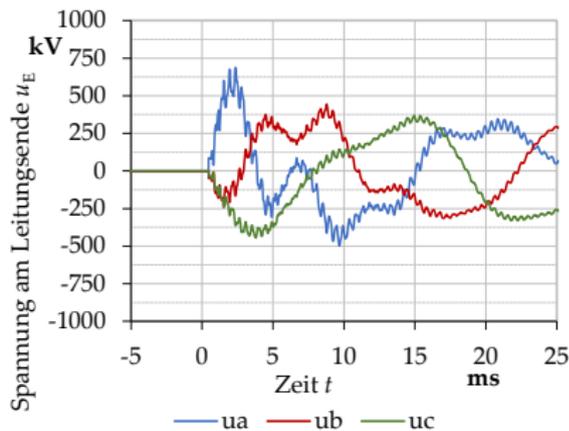
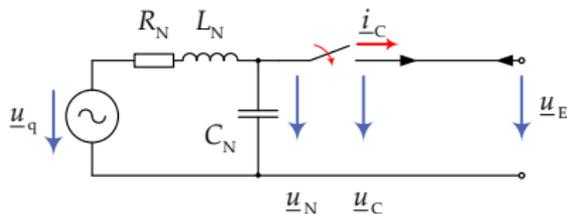
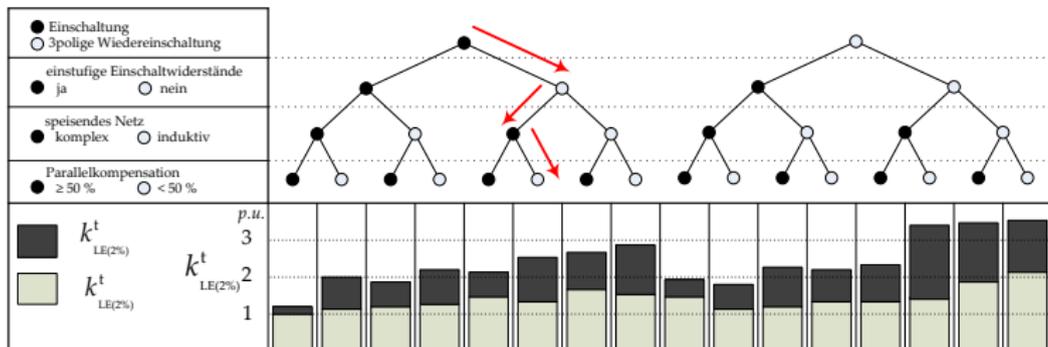


Abb: Einschaltung einer 380-kV-Leitung mit Kabel-Freileitungsanteil;
Strom/Spannung am Leitungsende: $k_{LE}^t \approx 2,5$

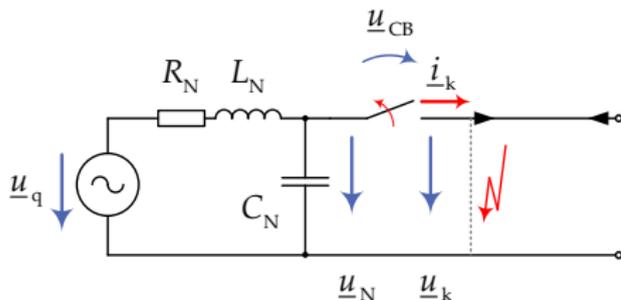
04 Schalten kapazitiver Ströme

Einschaltung von Freileitungen und Kabeln - IEC 60071-2



04 Schalten von Kurzschlüssen

Klemmenkurzschluss



Teilvorgänge:

- Ausgleichsvorgang des Netzes

$$f_{e(N)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_N \cdot C_N}}$$

- hohe Einschwingspannung über dem Leistungsschalter

$$\hat{u}_{cb} \approx 2 \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2}$$

- sehr hohe Steilheiten der Einschwingspannung u_{CB}

04 Schalten von Kurzschlüssen

Klemmenkurzschluss

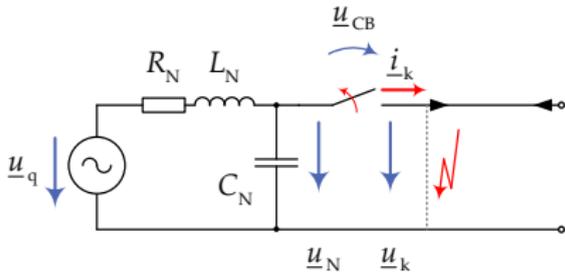
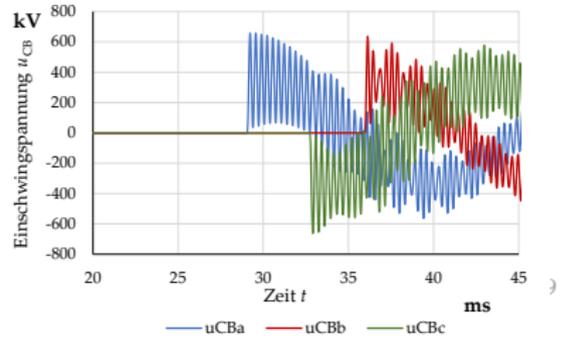
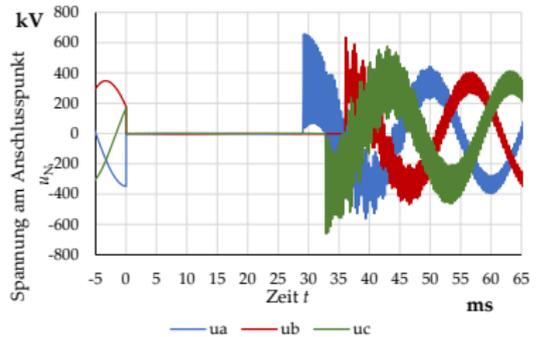
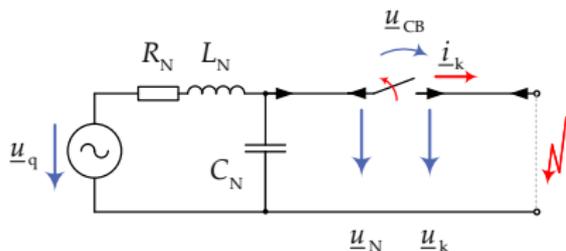


Abb: Spannung netzseitig: $k_{LE}^t \approx 2,0$



04 Schalten von Kurzschlüssen

Inverser Abstandskurzschluss



- Ausgleichsvorgang der geschalteten Leitung(en)

$$f_{e(w)} = \frac{v_w}{4 \cdot \ell_b}$$

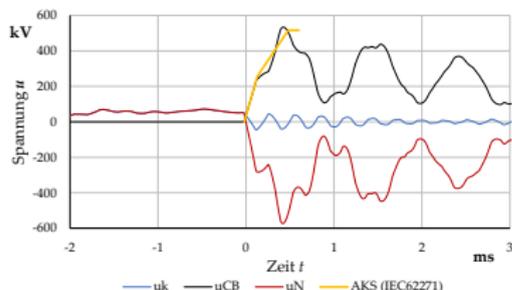
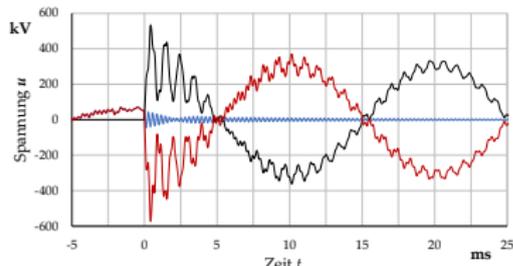
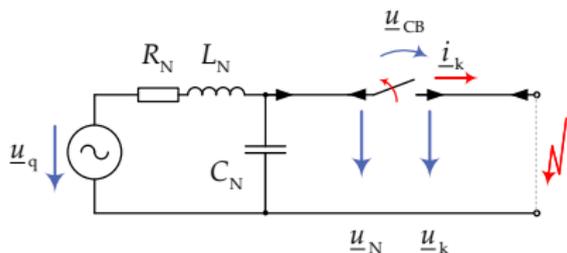
- Einschwingspannung u_{CB}

$$\frac{du_k}{dt} = -\hat{i} \cdot Z_w \cdot \omega$$

$$\frac{du_N}{dt} = \hat{i} \cdot Z_w \cdot \omega$$

04 Schalten von Kurzschlüssen

Inverser Abstandskurzschluss





04 Schalten von Kurzschlüssen

Beanspruchung der Leistungsschalter

1. Die Abschaltung von Kurzschlüssen stellt eine sehr große Beanspruchung der Schaltstrecke von Leistungsschaltern dar.
2. Klemmenkurzschlüsse führen zu Einschwingspannungen über der Schaltstrecke, die in ihrer Steilheit vom vorgelagerten Netz und den daraus resultierenden Eigenfrequenzen abhängig sind. Besonders hoch beansprucht sind dabei Generator-Leistungsschalter.
3. Inverse Abstandskurzschlüsse führen leitungs- und netzseitig zu Wanderwellen-Ausgleichsvorgängen, die im Freileitungsnetz zu sehr großen Steilheiten und Scheitelwerten der Einschwingspannung führen können.
4. Wiederzündungen der Schaltstrecke von Leistungsschaltern können im Extremfall zur Zerstörung des Schalters führen.



05 Überspannungsfaktoren

Richtwerte

Szenario	Überspannungsfaktor k^t
Erdschlusseintritt	$\approx 2,5$
Einschaltung von Leitungen	$\approx 2,5 \dots 3,4 (4,0)$
Klemmenkurzschluss	$\approx 2,0 \dots 2,5$
Abschaltung großer Induktivitäten	$\approx 1,0 \dots \uparrow$
Einschaltung von Leitungen	$\approx 1,0 \dots \uparrow$



Kein Ding auf der Welt ist vollkommen.

Konfuzius (551 - 479 v. Chr.)

Uwe Schmidt
Hochschule Zittau Görlitz
Fakultät Elektrotechnik und Informatik
Professur Energiesysteme
02763 Zittau
Tel.: +49 (3583) 612-4307
E-Mail: uwe.schmidt@hszg.de