

Allgemeine Bemerkungen zur Isolationsbemessung

Grundlage für die gesamte Isolationsbemessung und -koordination in Drehstromnetzen ist die maximale, dauernd zulässige Betriebsspannung U_m

Effektivwert der Spannung zwischen den Hauptleitern eines Drehstromsystems!

In nationalen und internationalen Normen (IEC, EN, VDE, ANSI, BS, CSA ...) wird bei der Isolationsbemessung von genormten abgestuften Werten für U_m ausgegangen.

Übliche Werte für U_m in Mitteleuropa sind z.B.:

7,2 kV; 12 kV; 24 kV; 36 kV; 72,5 kV; 123 kV; 245 kV; 420 kV

In **symmetrisch gespeisten Drehstromnetzen** ist die **Leiter-Erd-Spannung im fehlerfreien Betrieb**

um den **Faktor $1/\sqrt{3}$** geringer als die Spannung zwischen den Hauptleitern.

Allgemeine Bemerkungen zur Isolationsbemessung

Definition Überspannung:

Spannungen, deren Scheitelwert \hat{u} den Scheitelwert der jeweiligen Bezugsspannung ($\hat{U}_m = \sqrt{2} U_m$ bzw. $\hat{U}_m / \sqrt{3} = 2 U_m / \sqrt{3}$) überschreiten.

Überspannungen sind Vorgänge, die

- zeitlich begrenzt,
- z. T. stark gedämpft
- z. T. mit relativ kurzer Zeitdauer
- oder
auch ungedämpft bzw. nur schwach gedämpft

sein können.

Beide Gruppen sind nicht immer klar voneinander abgrenzbar.

2. Elektrische Beanspruchung von Betriebsmitteln

2.1 Stationäre Spannungsbeanspruchungen

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Auftreten:

Meist als Folge von:

- Schalthandlungen oder
- Isolationsfehlern

In der Regel auf wenige Sekunden begrenzt.

Ausnahme:

Betriebsfrequente Überspannungen bei einem Erdschluss in

- gelöschten Netzen oder
- Netzen mit freiem Sternpunkt,

Können bis zu mehreren Stunden bestehen.

Häufigste Ursachen für zeitweilige, betriebsfrequente Spannungserhöhungen:

- Erdschlüsse bzw. Erdkurzschlüsse,
- Lastabwürfe bei großen Generatoren und
- die Entlastung langer Freileitungen.

Erdschlüsse und Erdkurzschlüsse

Allgemeine Auswirkungen unsymmetrischer Fehler mit Erdberührung in Drehstromnetzen:

- mehr oder weniger starke Verzerrung des Drehspannungssystems
- Betriebsfrequente Spannungsanhebung der nicht vom Fehler betroffenen Phasen
(vor allem bei Fehlern mit Erdberührung)

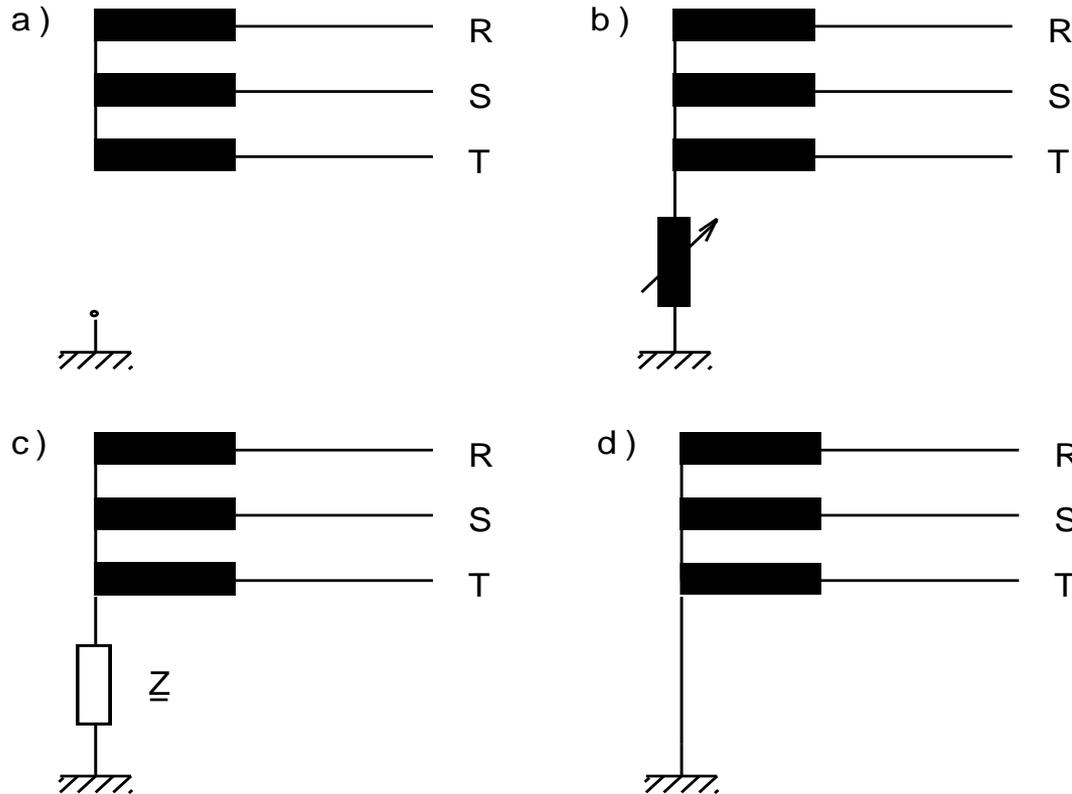
Einfluss der Sternpunktbehandlung

Die Art der Sternpunktbehandlung bestimmt wesentlich die

- Höhe der Fehlerströme bei Fehlern mit Erdberührung,
- Höhe der betriebsfrequenten Spannungserhöhung und
- die Höhe der transienten Überspannungen im Fehlerfall.

Häufigster Fehler in Hochspannungsnetzen ($\geq 110\text{kV}$): Einpoliger Fehler

Arten der Sternpunktbehandlung in Hochspannungsnetzen



a) Freier Sternpunkt;
c) strombegrenzend geerdet
(R oder L)

b) Erdschlusskompensation;
d) niederohmig (starr) geerdet

Arten der Sternpunktbehandlung

Auswirkungen der Art der Sternpunktbehandlung auf Ströme und Spannungen

- Kleine Fehlerströme an der Erdschlussstelle in Netzen mit
 - freiem Sternpunkt oder
 - Erdschlusskompensation
- ➔ hohe betriebsfrequente und transiente Überspannungen der nicht vom Fehler betroffenen Leiter.

- Niederohmige Sternpunktterdung
- ➔ große Erdkurzschlussströme und geringe betriebsfrequente und transiente Überspannungen.

Erdfehlerfaktor δ (früher Erdungszahl $\varepsilon = \delta / \sqrt{3}$)

- Kenngröße zur Charakterisierung der Auswirkungen der Sternpunktbehandlung im Netz auf
 - die Spannungsanhebung der nicht fehlerbetroffenen Leiter
 - bei Fehlern mit Erdberührung
 - an einem Betrachtungsort

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

δ in der Praxis stets ≥ 1

mit

$U_{LE \max}$ = Effektivwert eines nicht fehlerbetroffenen Leiters während eines Fehlers mit Erdberührung an einer beliebigen Stelle

$U/\sqrt{3}$ = Effektivwert der betriebsfrequenten Leiter-Erde-Wechselspannung die ohne Fehler vorhanden wäre

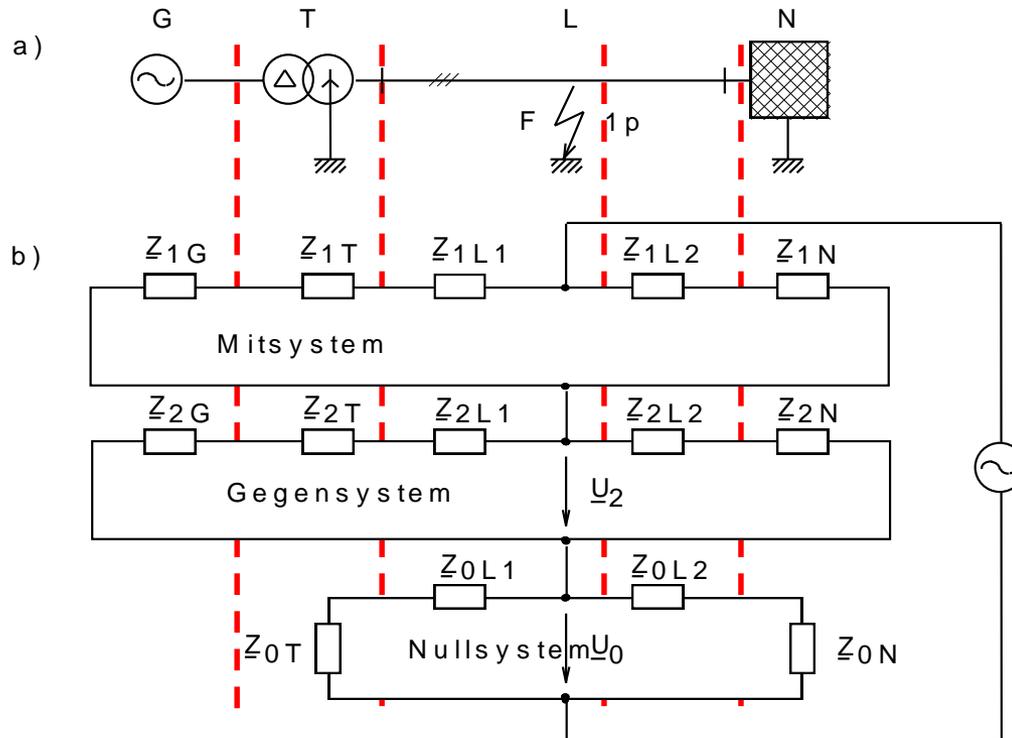
Erdfehlerfaktor δ

Aussagen des Erdfehlerfaktors δ

Der Erdfehlerfaktor

- bezieht sich nur auf einen bestimmten Ort eines Drehstromnetzes (z.B. auf den Einbauort eines Betriebsmittels) und
- bezieht sich auf einen bestimmten Netzzustand
- ist ein rein numerischer Wert und im allgemeinen größer als 1
- kennzeichnet die Erdungsbedingungen eines Netzes an einem bestimmten Ort,
- ist unabhängig von der Betriebsspannung an diesem Ort.

Berechnung des Erdfehlerfaktors δ



$$\bullet \underline{U}_S = -\frac{1}{2}\sqrt{3}E'' \left[\frac{\sqrt{3}}{1+2\underline{Z}_1/\underline{Z}_0} + j \right]$$

$$\bullet \underline{U}_T = -\frac{1}{2}\sqrt{3}E'' \left[\frac{\sqrt{3}}{1+2\underline{Z}_1/\underline{Z}_0} - j \right]$$

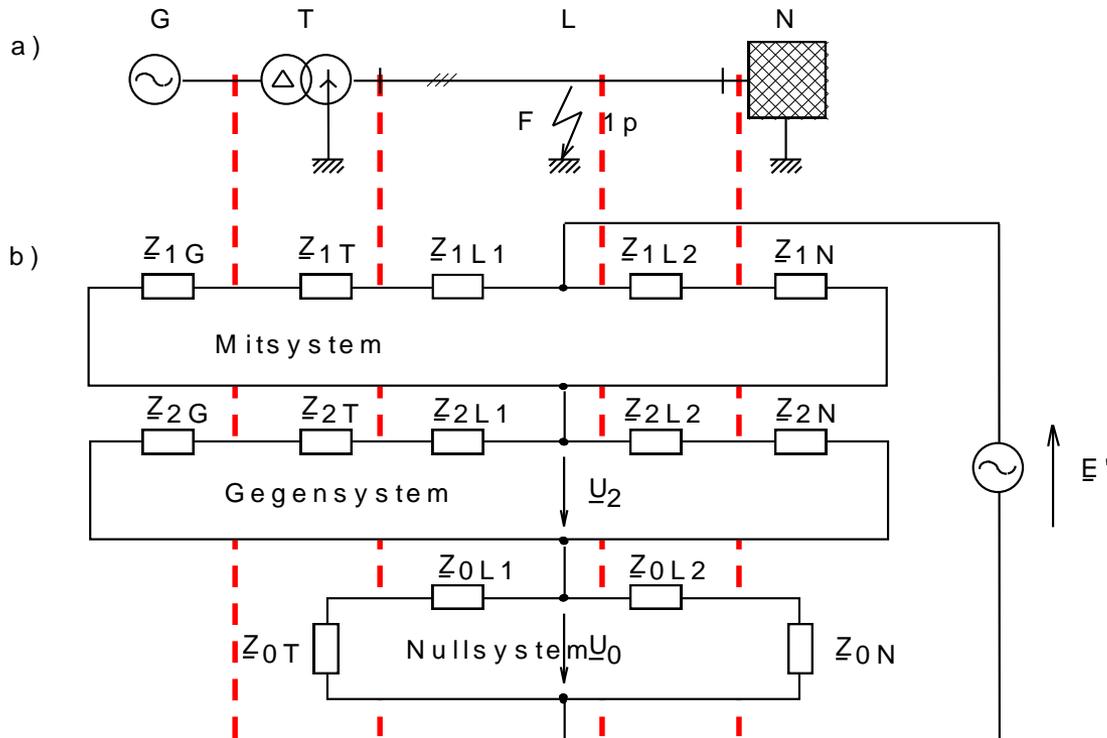
$$\bullet \delta_s = \left| \frac{\underline{U}_S}{E''} \right| = \frac{1}{2}\sqrt{3} \left| \frac{\sqrt{3}}{1+2\underline{Z}_1/\underline{Z}_0} + j \right|$$

$$\bullet \delta_r = \left| \frac{\underline{U}_T}{E''} \right| = \frac{1}{2}\sqrt{3} \left| \frac{\sqrt{3}}{1+2\underline{Z}_1/\underline{Z}_0} - j \right|$$

Beispiel zur Berechnung des Erdfehlerfaktors bei einpoligem Fehler in F

- a) Netzschaltbild;
- b) Ersatzschaltbild der Impedanzen in symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F

Berechnung des Erdfehlerfaktors δ



- Erdfehlerfaktor δ ist größerer Wert der beiden Werte
- δ_S bzw. δ_T

- Früher Erdungszahl ε :

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\sqrt{3}}$$

Beispiel zur Berechnung des Erdfehlerfaktors bei einpoligem Fehler in F

- Netzschaltbild;
- Ersatzschaltbild der Impedanzen in symmetrischen Komponenten an der Fehlerstelle F

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

- Kleiner Fehlerstrom an der Erdschlussstelle
 - hohe betriebsfrequente und transiente Überspannungen der nicht vom Fehler betroffenen Leiter
(Netz mit freiem Sternpunkt oder mit Erdschlusskompensation)
- Hoher Erdkurzschlussstrom
 - geringe betriebsfrequente und transiente Überspannungen
(Netz mit niederohmiger Sternpunktbehandlung)
- Transiente Erdschlussüberspannungen
 - Überspannung bei Schalthandlungen (Mittelspannungsnetze mit Erdschlusskompensation - bis 110 kV - oder freiem Sternpunkt)
- Die transienten Erdschlussüberspannungen sind die höchst auftretenden Überspannungen

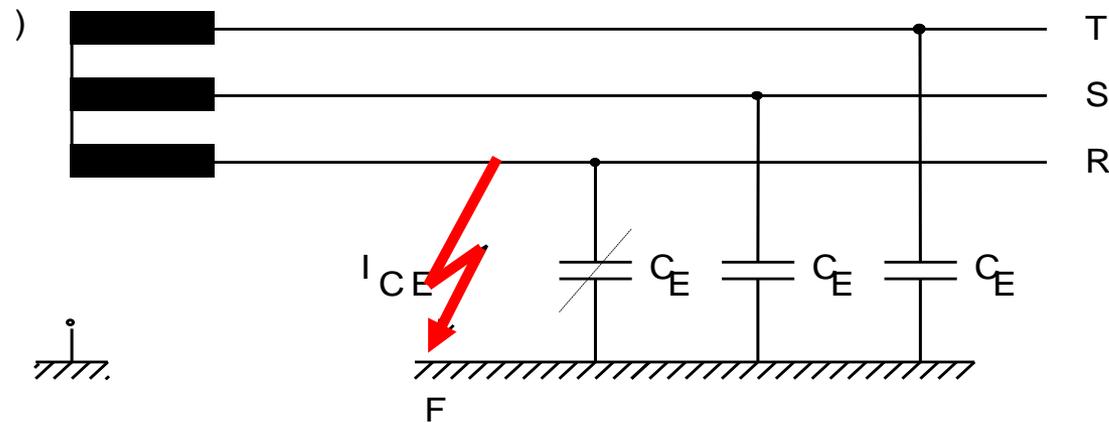
Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

- Besonders ungünstige Verhältnisse, wenn bei Netzen mit freiem Sternpunkt der Erdschluss durch wiederholtes Löschen und Neuzünden zu einem intermittierendem Erdschluss wird
- Netze mit freiem Sternpunkt oder Erdschlusskompensation können nach Auftreten eines einpoligen Fehlers (auch wenn nicht selbstlöschend) für bestimmte Zeit weiter betrieben werden
 - Zeit für zweckmäßige Maßnahmen zur Sicherstellung der Versorgung
- Gefahr bei diesem Vorgehen:
 - doppelter Erdschluss → Ausfall eines größeren Teils des Netzes
- Doppelerdschluss spielt keine Rolle bei Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung
 - (erster Fehler wird bei Erdberührung erfasst & ausgeschaltet)

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit isoliertem (freiem) Sternpunkt

- Art der Sternpunktbehandlung bei Mittelspannungsnetzen mit geringer Ausdehnung und geringem kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} (z.B. bei Eigenbedarfsnetzen in Kraftwerken)

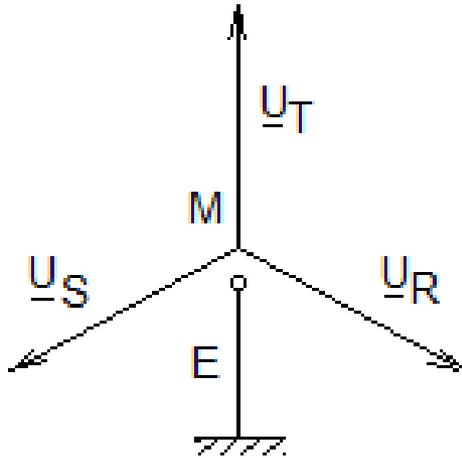


**Erdschluss des Leiters R in einem Netz mit freiem Sternpunkt
Prinzipschaltbild mit Leitererdkapazitäten C_E**

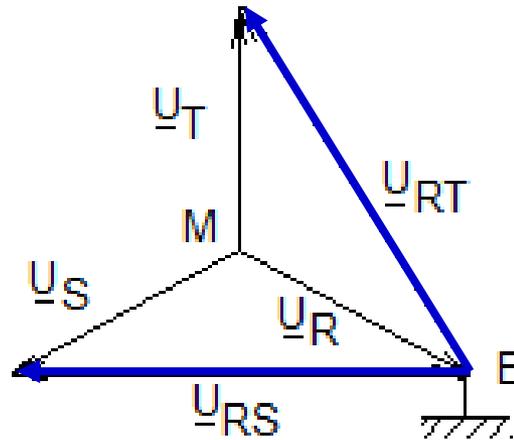
Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit isoliertem (freiem) Sternpunkt

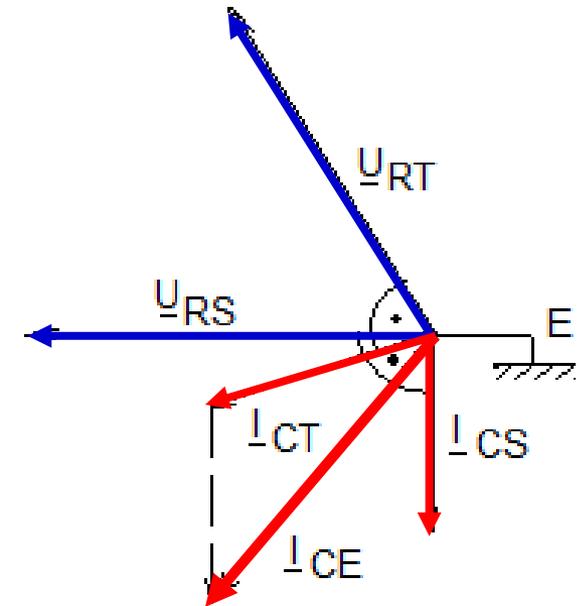
Spannungen im fehlerfreien Netzzustand



Spannungen während des Erdschlusses



kapazitive Fehlerströme
 \underline{I}_{CT} , \underline{I}_{CS} und \underline{I}_{CE}



Zeigerdiagramme bei Erdschluss im Netz mit freiem Sternpunkt

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz **Netze mit isoliertem (freiem) Sternpunkt**

- Der kapazitive Fehlerstrom I_{CE} an der Fehlerstelle F setzt sich aus den Komponenten I_{CS} und I_{CT} zusammen.
- Wegen der betriebsfrequenten Spannungsanhebung der nicht fehlerbetroffenen Leiter S und T auf den Wert der verketteten Spannung U ergibt sich:

$$I_{CE} = 2 \cdot U \omega C_E \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \omega C_E \cdot U$$

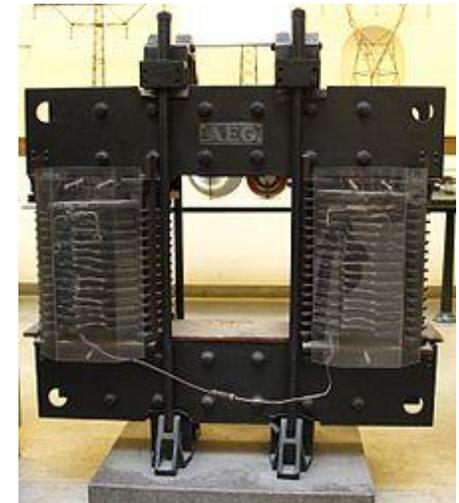
- **Erdfehlerfaktor δ in Netzen mit freiem Sternpunkt:**

stets $\sqrt{3}$

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation

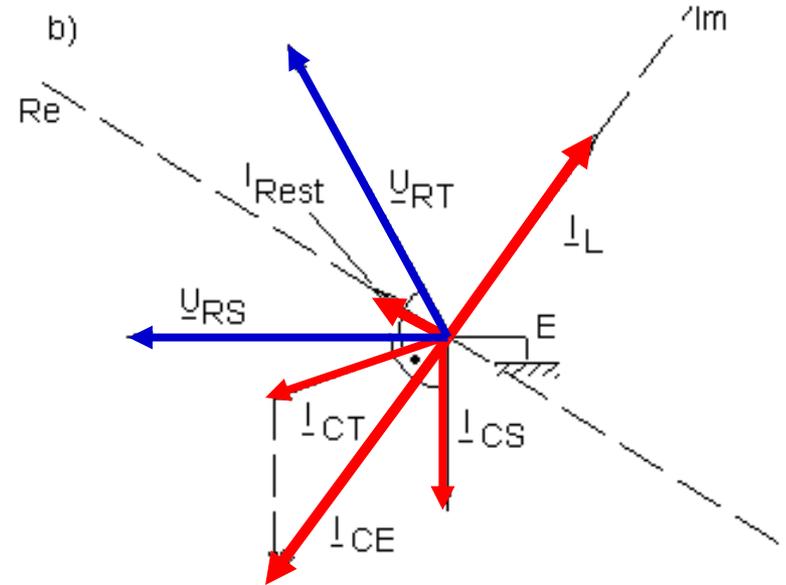
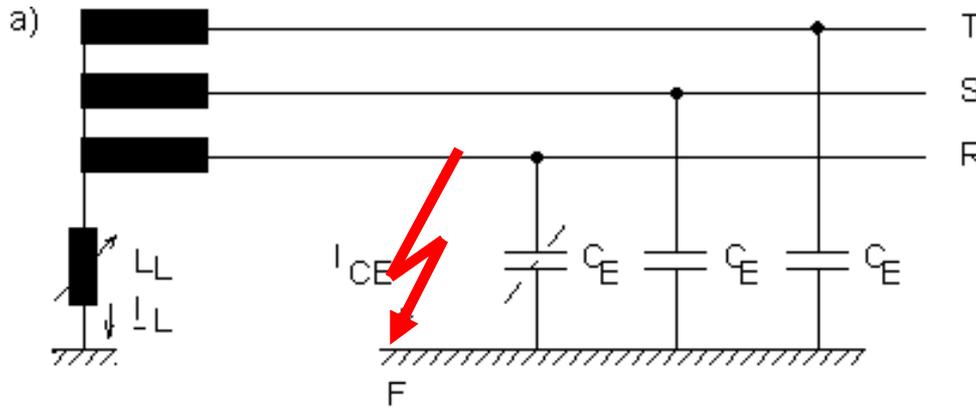
- 1 oder mehrere Transformatorsternpunkte werden über Löschspulen geerdet.
- **Löschspulen** sind entweder
 - **fest eingestellt**
 - oder
 - haben einen **Stufenschalter** oder **Tauchkern** zur Veränderung der Induktivität.
- Bei exakter Einstellung der Induktivität der Löschspule(n) auf die Kapazität des Netzes gegen Erde fließt bei einpoligen Fehlern nur der Erdschlussreststrom I_{Rest} an der Fehlerstelle.



Original der ersten
Petersen-Spule

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation



Erdschluss des Leiters R in einem Netz mit Erdschlusskompensation

a) Prinzipschaltbild mit Leitererdkapazitäten C_E

b) Zeigerdiagramm der Spannungen und Ströme

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation

- Bestimmung der Löschspuleninduktivität:

Bei Abstimmung der Löschspule auf die Leiter-Erde-Kapazität, muss die Spule während der Erdschlussdauer einen etwa

betragsgleichen, induktiven Strom über die Fehlerstelle treiben.

→ Kompensation des kapazitiven Erdschlussstroms an der Fehlerstelle

- Reaktanz der Löschspule:

$$L_L = \frac{1}{3 \omega^2 C_E}$$

- Erdfehlerfaktor δ im gelöschten Netz mit richtig eingestellter Löschspule:

$$\delta = \sqrt{3}$$

Bei Unterkompensation sind wesentlich größere Werte möglich!

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation

- der Reststrom in Freileitungsnetzen kann meist kleiner als 10% gehalten werden, wenn die Leiter-Erde-Kapazitäten aller drei Leiter etwa gleich groß sind
- bei großer Unsymmetrie ist eine Abstimmung der Löschspulen nicht mehr möglich
- in Kabelnetzen erreicht man $I_{\text{Rest}} \approx (0,03 \dots 0,04) \cdot I_{\text{CE}}$
- in Freileitungs- oder gemischten Freileitungs- und Kabelnetzen kann man durch Anwendung der Erdschlusskompensation erreichen, dass die überwiegende Zahl an Erdschlüssen selbsttätig gelöscht wird
→ Vermeidung von Betriebsunterbrechung

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation

- in reinen Kabelnetzen meist nur eine Begrenzung des Fehlerstromes möglich, aber keine Selbstlöschung
- Sternpunktterdung über strombegrenzende Reaktanzen oder ohmsche Widerstände günstiger
- Einsatz der Erdschlusskompensation im Bereich der Mittelspannungsebenen bis einschließlich 110 kV
- Erdschlusskompensation aufgrund großer Restströme bei Nennspannungen über 110 kV – die Lichtbogenlöschung verhindern – nicht mehr möglich

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Netze mit Erdschlusskompensation

- **Reine Kabelnetz:**

Ziel: Begrenzung des Fehlerstromes aber keine Selbstlöschung.

(Anmerkung:

Sternpunktterdung über strombegrenzende Reaktanzen oder ohmsche Widerstände günstiger)

- **Einsatzbereich der Erdschlusskompensation:**

Mittelspannungseben bis einschließlich 110 kV

- **Nennspannungen über 110 kV:**

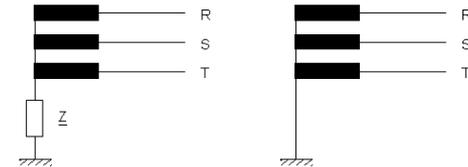
Aufgrund

- großer Restströme (verhindern Lichtbogenlöschung) und
- hoher betriebsfrequenter und transientser Spannungsbeanspruchung der Isolation (teuer)

nicht mehr möglich bzw. sinnvoll.

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Niederohmige Sternpunktterdung



- nach VDE 0141 liegt diese Form der Sternpunktbehandlung vor, wenn der Sternpunkt unmittelbar oder über strombegrenzende Wirk- oder Blindwiderstände geerdet ist
- Netzschutz muss so ausgebildet sein, dass bei Erdschluss an einer beliebigen Stelle es zu einer selbsttätigen Ausschaltung kommt
- wie Wirksamkeit der niederohmigen Sternpunktterdung kann durch Erdfehlerfaktor δ oder Erdungszahl ε beschrieben werden
- in Netzen ≥ 220 kV strebt man $\delta < 1,4$ / $\varepsilon \leq 0,8$ an („starre Sternpunktterdung“)

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Niederohmige Sternpunktterdung

„Starre Sternpunktterdung“:

Immer in Netzen ≥ 220 kV ($\delta < 1,4$ bzw. $\varepsilon \leq 0,8$)

- **Vorteile der starren Sternpunktterdung:**

- **Niedrige betriebsfrequente Spannungserhöhung** bei Fehlern mit Erdberührung → resultierende niedrige transiente Überspannungen
- **Beträchtliche Kostenminderung durch Isolationseinsparung** an den Betriebsmitteln.

- **Nachteil:**

- **Große Erdkurzschlussströme im kA-Bereich**
 - erfordern bereits bei einpoligen Fehlern die Abschaltung bzw. Kurzunterbrechung (ein- oder dreipolige) der fehlerbehafteten Betriebsmittel.
 - Bemessung der Erdungsanlage wichtig!
(Vermeidung von unzulässig hoher Berührungsspannungen)

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Gesamtüberblick Sternpunktbehandlung

Sowohl der **Erdfehlerfaktor δ** als auch das **Verhältnis I''_{k1p}/I''_{k3p}** des 1-poligen zum 3-poligen Anfangs-Kurzschlusswechselstrom sind eine Funktion des Verhältnis von Null- zu Mitimpedanz Z_0/Z_1 . (näherungsweise X_0/X_1 bei $R_2 = R_1 = 0$)

3-polige Fehlerstrom I''_{k3p}

$$I''_{k3p} = \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3} Z_1}$$

1-polige Fehlerstrom I''_{k1p}

$$I''_{k1p} = \frac{1,1 U_n \sqrt{3}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Durch Division der beiden Gleichungen und Auflösung nach I''_{k1p} erhält man unter der Annahme von $Z_1 = Z_2$

$$I''_{k1p} = I''_{k3p} \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}}$$

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Gesamtüberblick Sternpunktbehandlung

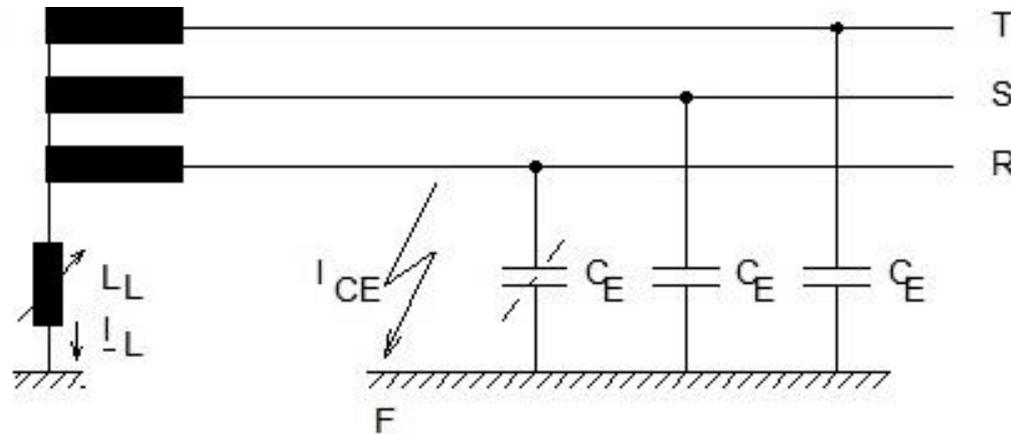
$$I''_{k1p} = I''_{k3p} \frac{3}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}}$$

- Für $Z_0 = Z_1$ wird der 1- und 3-polige Fehlerstrom gleich groß.
- Wird die gesamte Nullimpedanz Z_0 an einer Fehlerstelle kleiner als die Mitimpedanz Z_1 , so wird der 1-polige Fehlerstrom größer als der 3-polige.
 - Notwendigkeit der Dimensionierung Betriebsmittel für den größeren 1-poligen Fehlerstrom (unnötige Zusatzkosten !!)

→ Sinnvolle Bedingung an der Fehlerstelle : $Z_0 > Z_1$

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Gesamtüberblick Sternpunktbehandlung

Für ein Netz mit Erdschlusslöschung gilt vereinfacht für die Nullimpedanz Z_0 (unter Vernachlässigung der Impedanzen des Transformators):



$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{j\omega C_E + \frac{1}{3j\omega L_K}} = \frac{1}{j(\omega C_E - \frac{1}{3\omega L_K})} = j \frac{1}{\frac{1}{3\omega L_K} - \omega C_E}$$

→ Z_0 kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen !!!

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Gesamtüberblick Sternpunktbehandlung

Für den Teilbereich **Netz mit Erdschlusslöschung** gilt:

- Für kleine Werte der Löschspuleninduktivität L_K ergeben sich positive Z_0 -Werte (induktive resultierende Nullimpedanz),
- Für große Werte der Löschspuleninduktivität L_K ergeben sich negative Z_0 -Werte (kapazitive resultierende Nullimpedanz).

Auswirkung auf den Erdfehlerfaktor δ :
$$\delta_s = \left| \frac{\underline{U}_s}{\underline{E}''} \right| = \frac{1}{2} \sqrt{3} \left| \frac{\sqrt{3}}{1 + 2 \underline{Z}_1 / \underline{Z}_0} + j \right|$$

Erdfehlerfaktor δ geht für negative Werte bei $Z_0 = -2 Z_1$ gegen unendlich ($\delta \rightarrow \infty$).

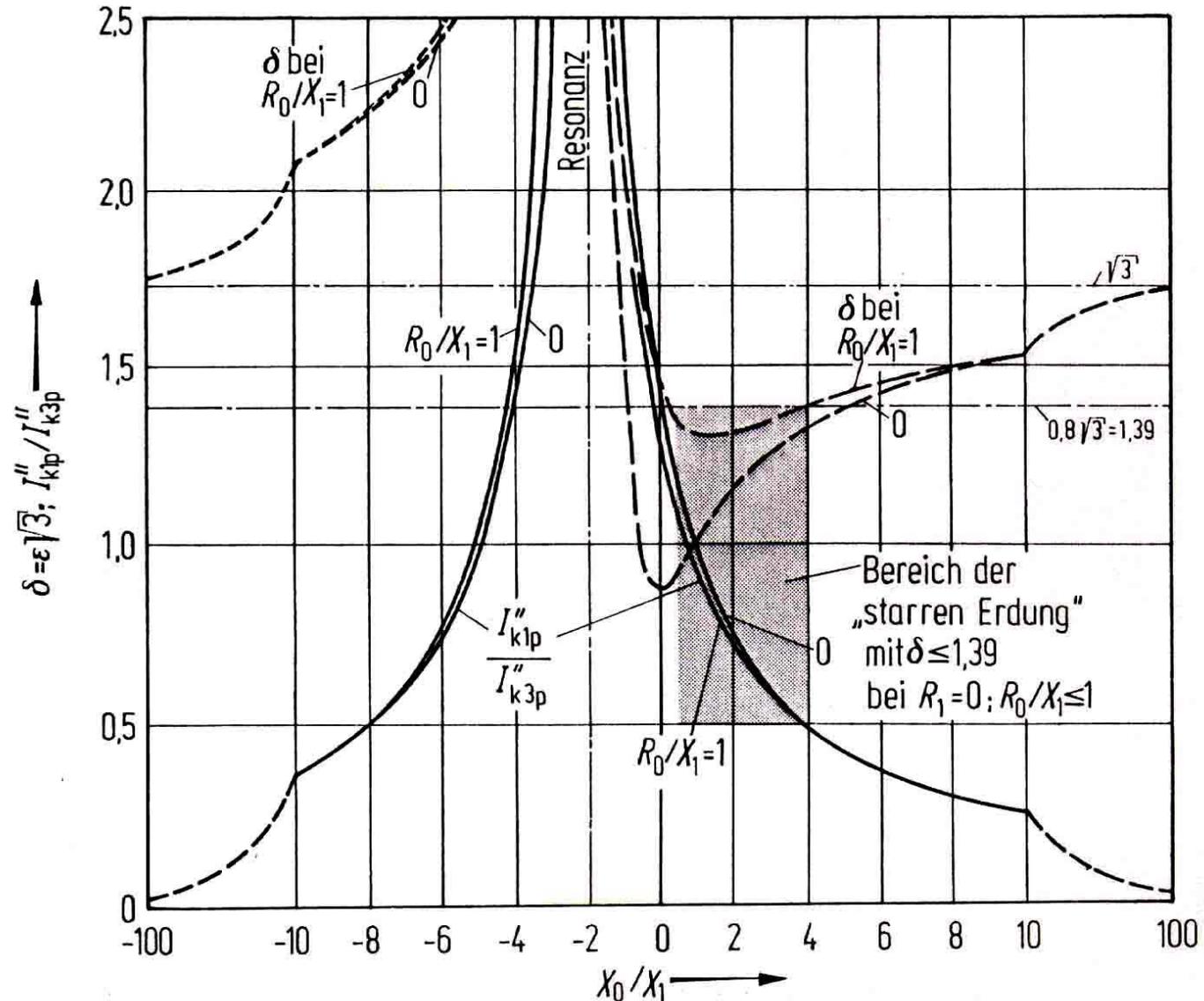
Eine sogenannte **Unterkompensation eines gelöschten Netzes** bewirkt also im Fehlerfall zu Spannungsanhebungen im Netz und kann im ungünstigsten Fall (Resonanz) zu extrem hohen Überspannungen (d.h. Isolationsversagen) führen!

→ Erdschlusslöschspulen werden auf leichte Überkompensation eingestellt!

2. Spannungsbeanspruchungen von Betriebsmitteln in Netzen

Zeitweilige
Spannungs-
erhöhungen
mit
Betriebsfrequenz

Gesamtüberblick
Sternpunkt-
behandlung



Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Lastabwurf

Ausgangssituation

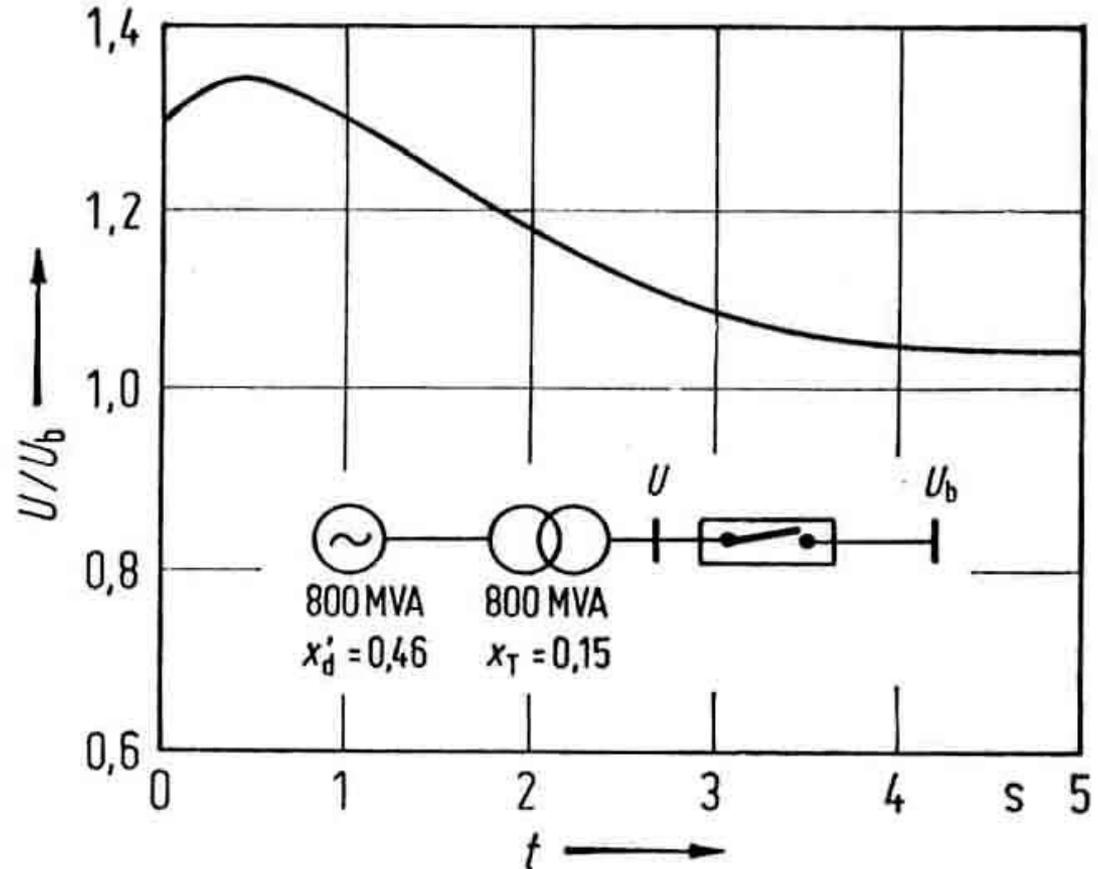
- Um die Betriebsspannung im Netz konstant zu halten muss die Erregung der Generatoren um den Betrag des Spannungsabfalls an den Streureaktanzen von Generator, Blocktransformator und Netzeinspeisung höher eingestellt werden.

Lastabwurf

- Bis die Erregerregelung den Erregerstrom heruntergeregelt hat steht im Bereich der Netzeinspeisung bis zum geöffneten Schalter (nach dem raschen Abklingen der subtransienten Vorgänge) die transiente Spannung des Generators an.
- Spannungsanhebungen durch Lastabwurf können vor allem bei großen Generatoren mit entsprechend hohen Werten der Streureaktanzen von Generator und Blocktransformator über mehrere Sekunden anhalten.

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Lastabwurf

Spannungsverlauf im Netz
beim Ausschalten der
Nennleistung eines
800-MVA-Blocks
(Turbogenerator und
Transformator)



Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Ferranti-Effekt

Leitungsgleichungen für die verlustlose Leitung

$$\frac{\underline{U}_1}{\sqrt{3}} = \frac{\underline{U}_2}{\sqrt{3}} \cos(\beta l) + j \underline{I}_2 Z_w \sin(\beta l)$$

Setzt man den Strom $I_2 = 0$ (Leerlauf), so erhält man für den Betrag des Spannungsverhältnisses

$$\left| \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} \right| = \frac{1}{\cos(\beta l)}$$

**→ Spannungsanhebung am Ende einer leerlaufenden Leitung
Höhe dieses Effekts hängt maßgeblich von der Leitungslänge ab.**

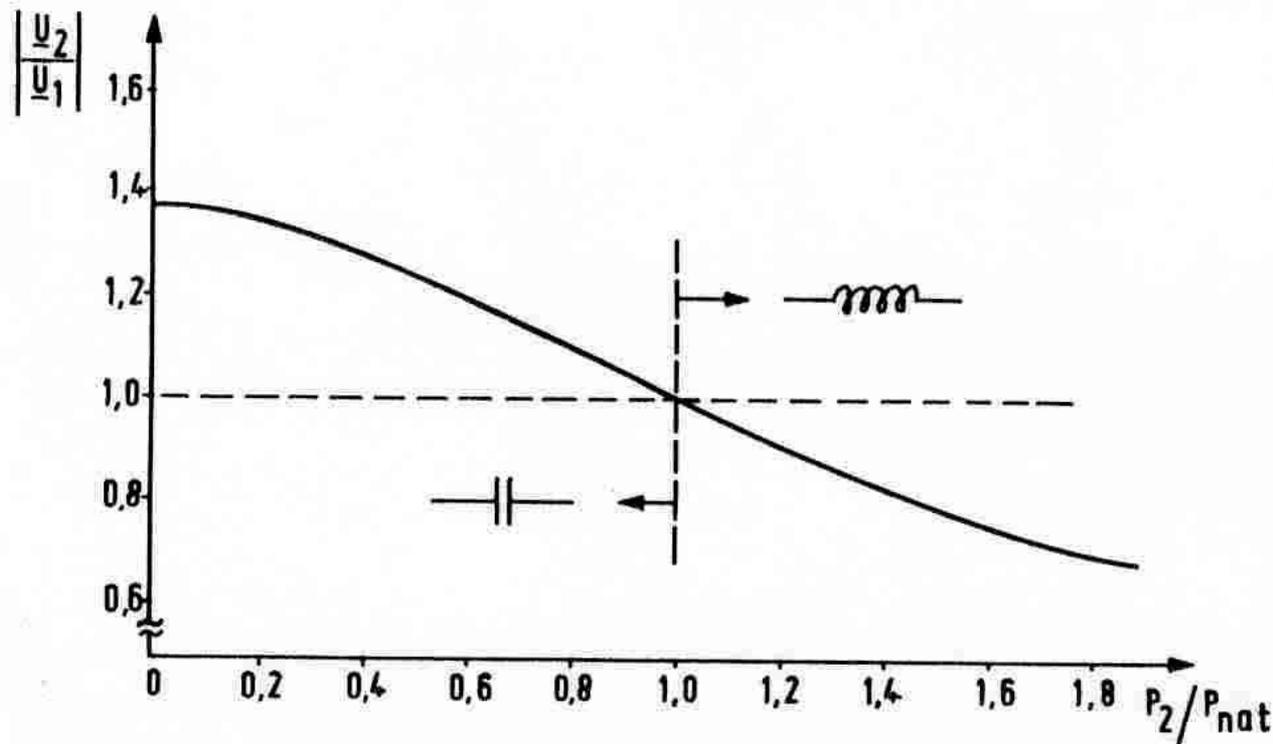
Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Ferranti-Effekt

Leitungsverhalten bei unterschiedlicher Belastung

- Bei **Leerlauf oder bei Betrieb mit einer Leistung unter der natürlichen Leistung** ($P_{\text{nat}} = U^2 / Z_w$) wird **kapazitive Ladeleistung** aufgenommen.
- Bei **Belastung mit einer Übertragungsleistung größer als die natürliche Leistung**, dann liegt **induktiver Blindleistungsbedarf** vor.

(Häufiger Belastungszustand bei hoher Belastung und verhältnismäßig kurzen Freileitungen bis einschließlich 110 kV)

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Ferranti-Effekt



**Verlauf der Spannung $\left| \frac{U_2}{U_1} \right|$ abhängig vom Verhältnis P_2/P_{nat}
für eine 700-kV-Drehstromleitung, ohne Kompensation**
($l = 700$ km; $L_1 = 0,271$ /km; $C_1 = 4,27$ μ S/km; $\beta l = 0,573$; $P_{nat} = 1945$ MW)

Stationäre Spannungsbeanspruchungen

Zeitweilige Spannungserhöhungen \neq Betriebsfrequenz

- Netze bestehen aus Induktivitäten und Kapazitäten
→ **Schwingkreise mit unterschiedlichen Resonanzfrequenzen**
- Wenn die Resonanzfrequenzen in der Nähe der Betriebsfrequenz bzw. einer ihrer Oberschwingungen liegt, kann es zu **Resonanzanregungen mit Überspannungsentwicklung** kommen.
- **Oberschwingungen in Netzen entstehen meist durch Transformatoren, induktive Spannungswandler und Stromrichter.**
- Bei Beteiligung von Vorgängen mit Eisensättigung ist die 3. Oberschwingung ausgeprägt.

Stationäre Spannungsbeanspruchungen

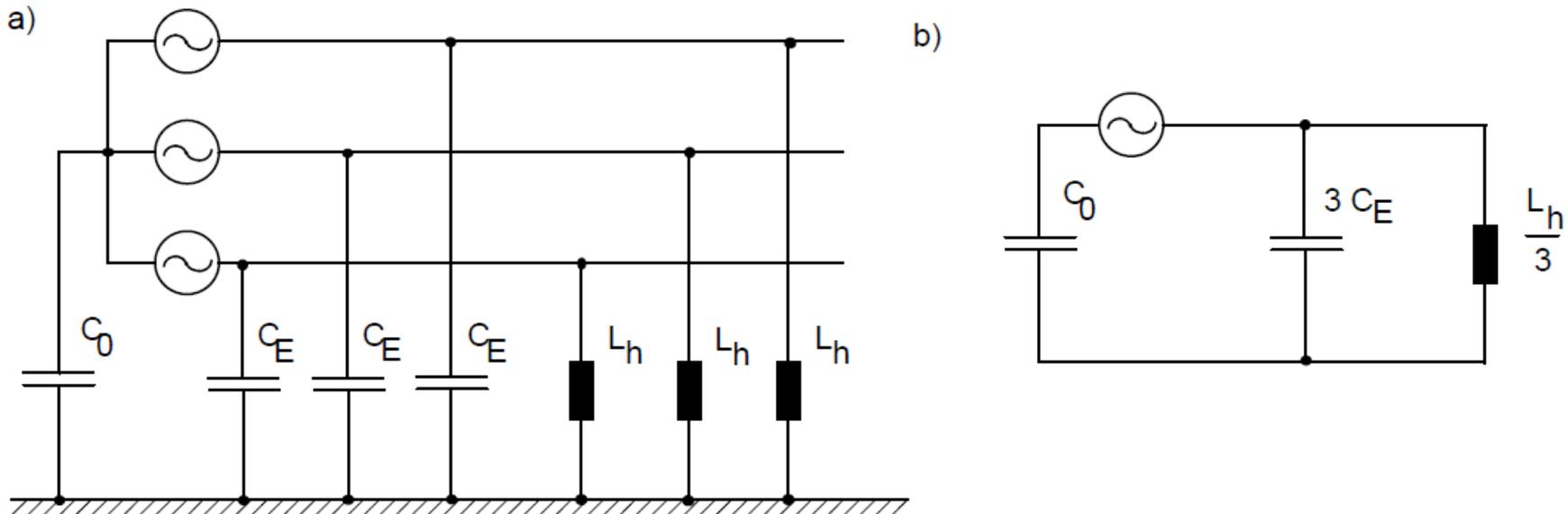
Zeitweilige Spannungserhöhungen \neq Betriebsfrequenz

Beispiel: Resonanzen

- Resonanzen treten z.B. gelegentlich in **Mittelspannungsnetzen** bei **Schaltzuständen mit isoliertem Sternpunkt und induktiven Spannungswandlern** auf.
- Durch die **Sättigung im Magnetisierungsstrom** entsteht vor allem die **3. Oberschwingung, mit in allen Leitern gleicher Phasenlage**.
- Ströme im Sternpunkt heben sich nicht auf, sie fließen (z.B. im abgeschalteten Abgang) bei kleiner Leiter-Erd-Kapazität über die Sternpunktkapazität C_0 (falls bei passender Größe von C_0 , C_E und L_h Resonanzfall auftritt \rightarrow Überspannungen an Impedanzen

Stationäre Spannungsbeanspruchungen

Zeitweilige Spannungserhöhungen \neq Betriebsfrequenz



Resonanzfähige Netzkonfiguration mit induktiven Spannungswandlern in einem Mittelspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt

a) vollständiges Schaltbild

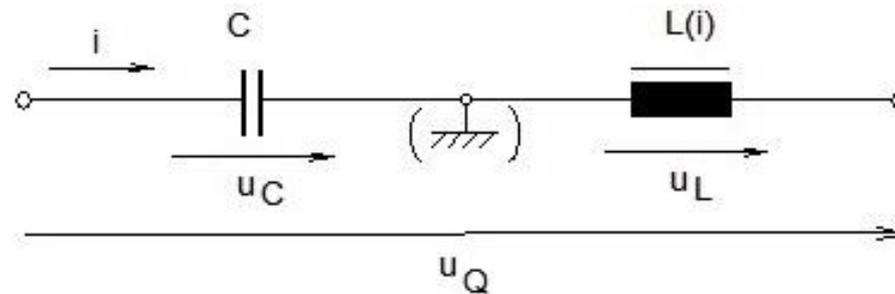
b) Ersatzschaltbild für die 3. Oberschwingung

L_h nichtlineare Hauptinduktivität der Spannungswandler,

C_0 Kapazität des Sternpunktes gegenüber Erde, C_E Leiter-Erde-Kapazität

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

- Entstehung nur in Kreisen mit nichtlinearen Induktivitäten möglich.
- Wird z.B. die Serienschaltung einer sättigungsbehafteten Induktivität mit einer Kapazität an eine eingepreßte Wechselspannung u_Q entsprechend hoher Amplitude gelegt, so muss der Betriebspunkt während des Durchlaufens der Kennlinie ggf. springen.



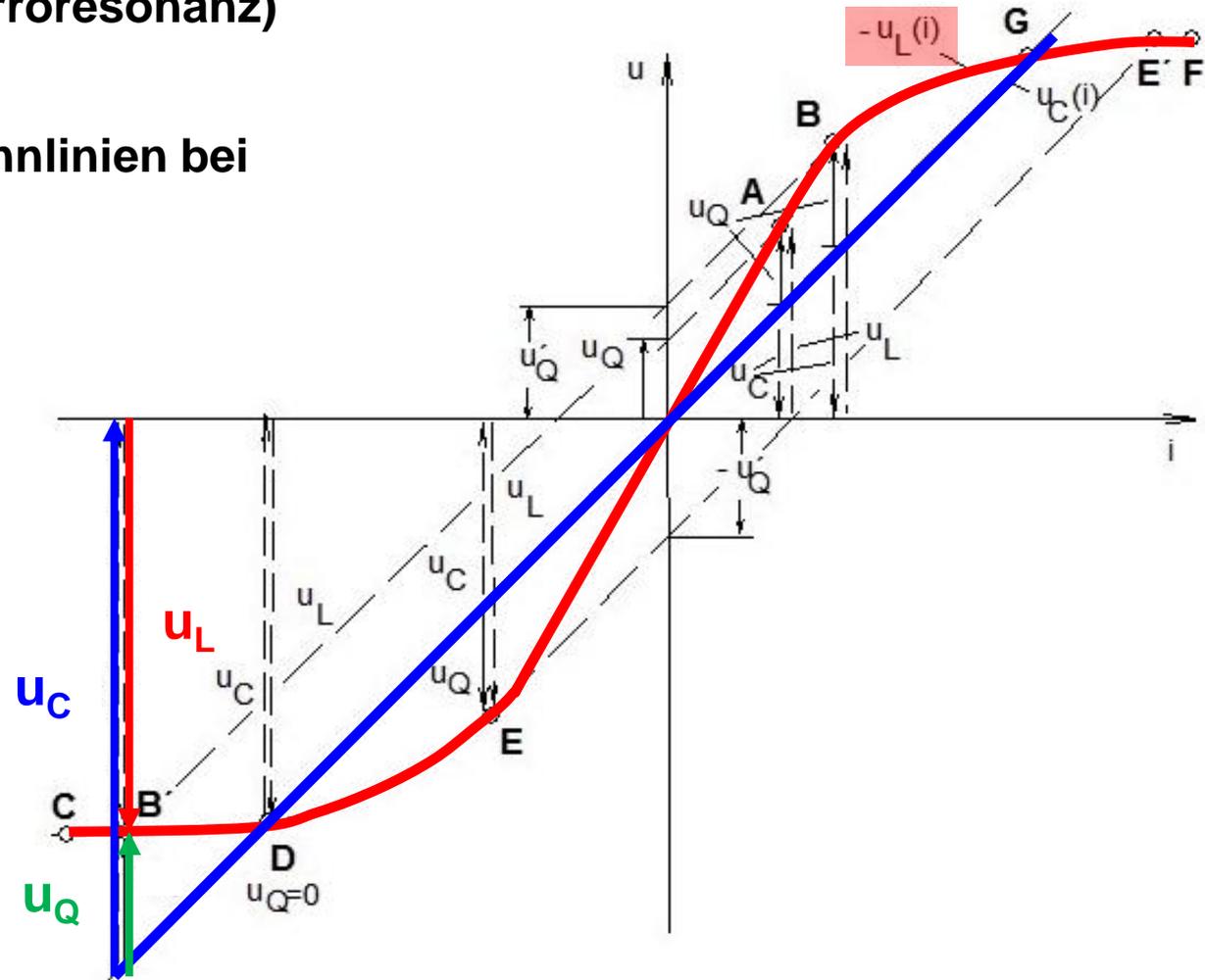
- L und C werden vom gleichen Strom i durchflossen
 - Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung jeweils entgegengesetzt
 - Summe der entgegengesetzt gerichteten Spannungen ergibt die Klemmenspannung u_Q .

$$u_Q = u_L + u_C$$

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

Strom-Spannungs-Kennlinien bei Ferroresonanz

$$u_Q = u_L + u_C$$



Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

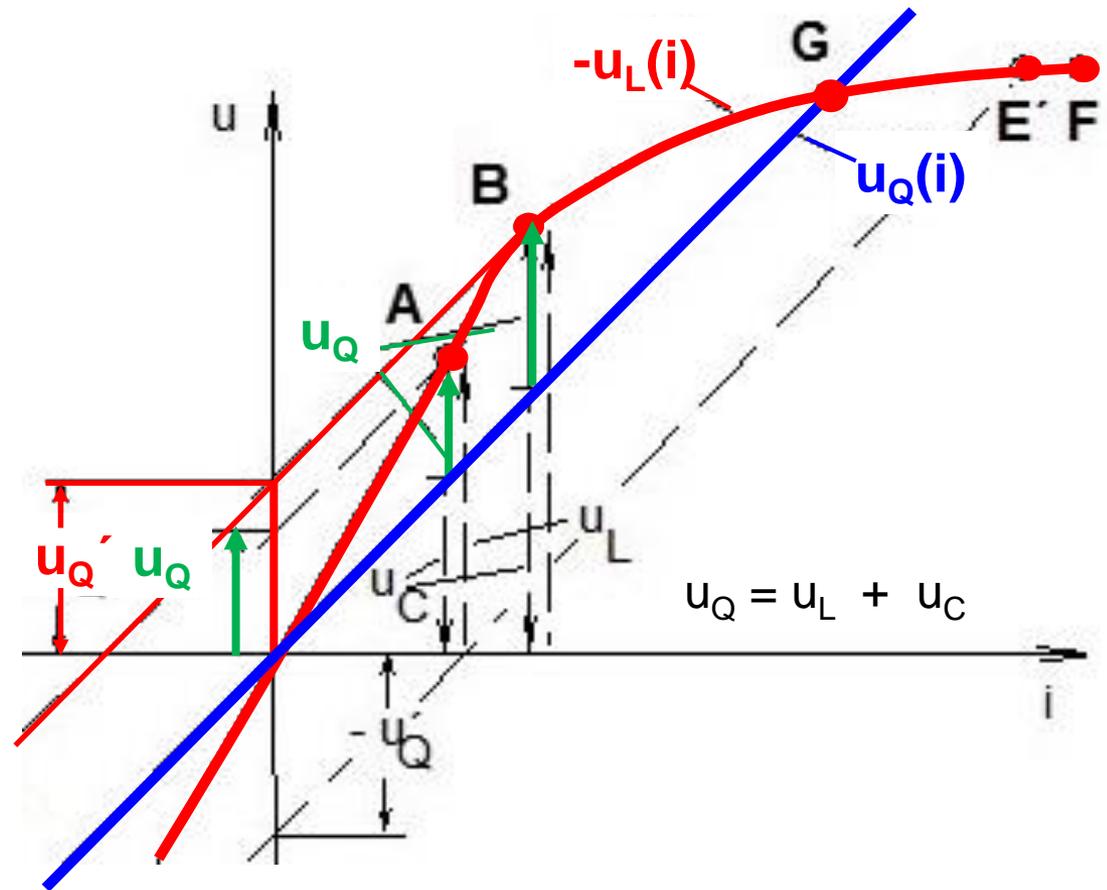
Aussteuerung der
Magnetisierungskurve
nur bis

$$u_Q < u_{Q'}$$

(Punkt B wird noch nicht erreicht)

→ nur stabile Betriebspunkte A

Stabiler Bereich, da für eine
Vergrößerung des Stromes i
auch die treibende Spannung
 u_Q anwachsen kann.



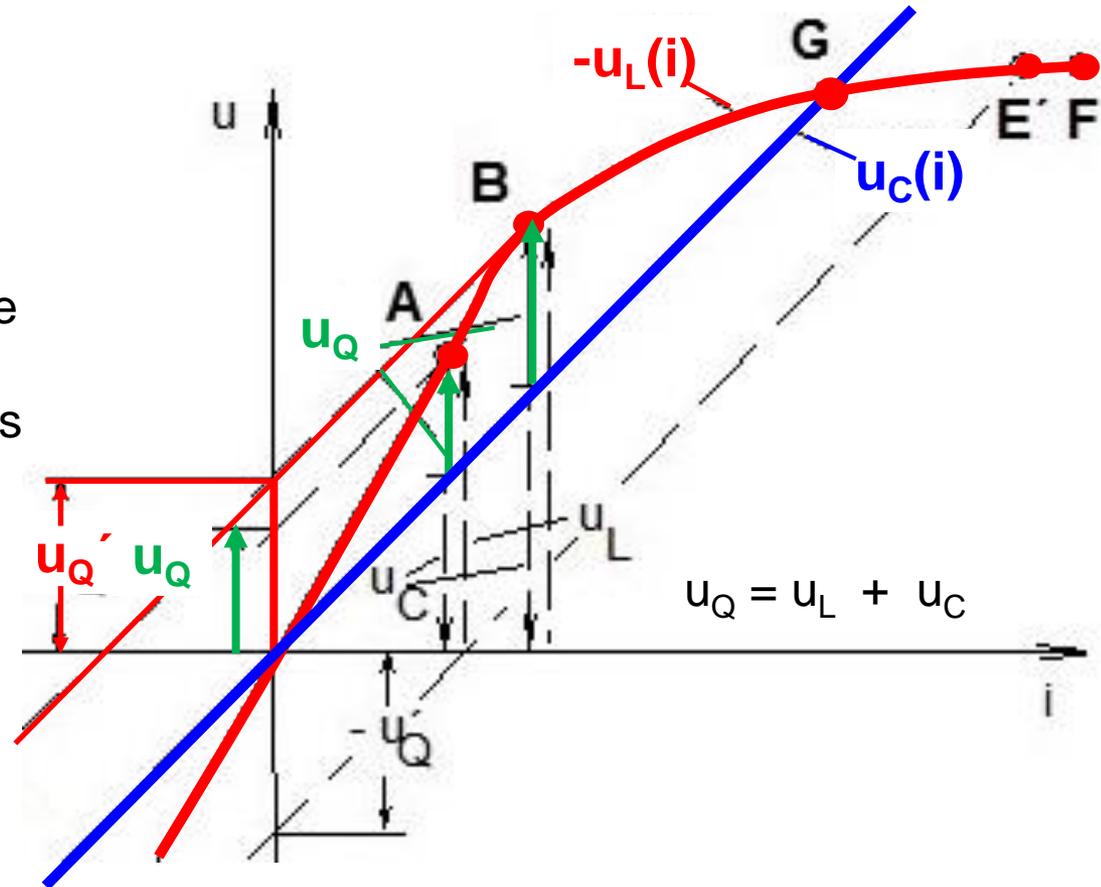
Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

Aussteuerung der Magnetisierungskurve bis über B

$$u_Q > u_{Q'}$$

→ Keine stabilen Betriebspunkte rechts von B mehr möglich, da eine weitere Zunahme des Stromes i eine kleinere Spannung u_Q erfordern würde.

→ Arbeitspunkt muss auf den unteren Kurvenzweig der Kennlinie springen (Pkt. B').

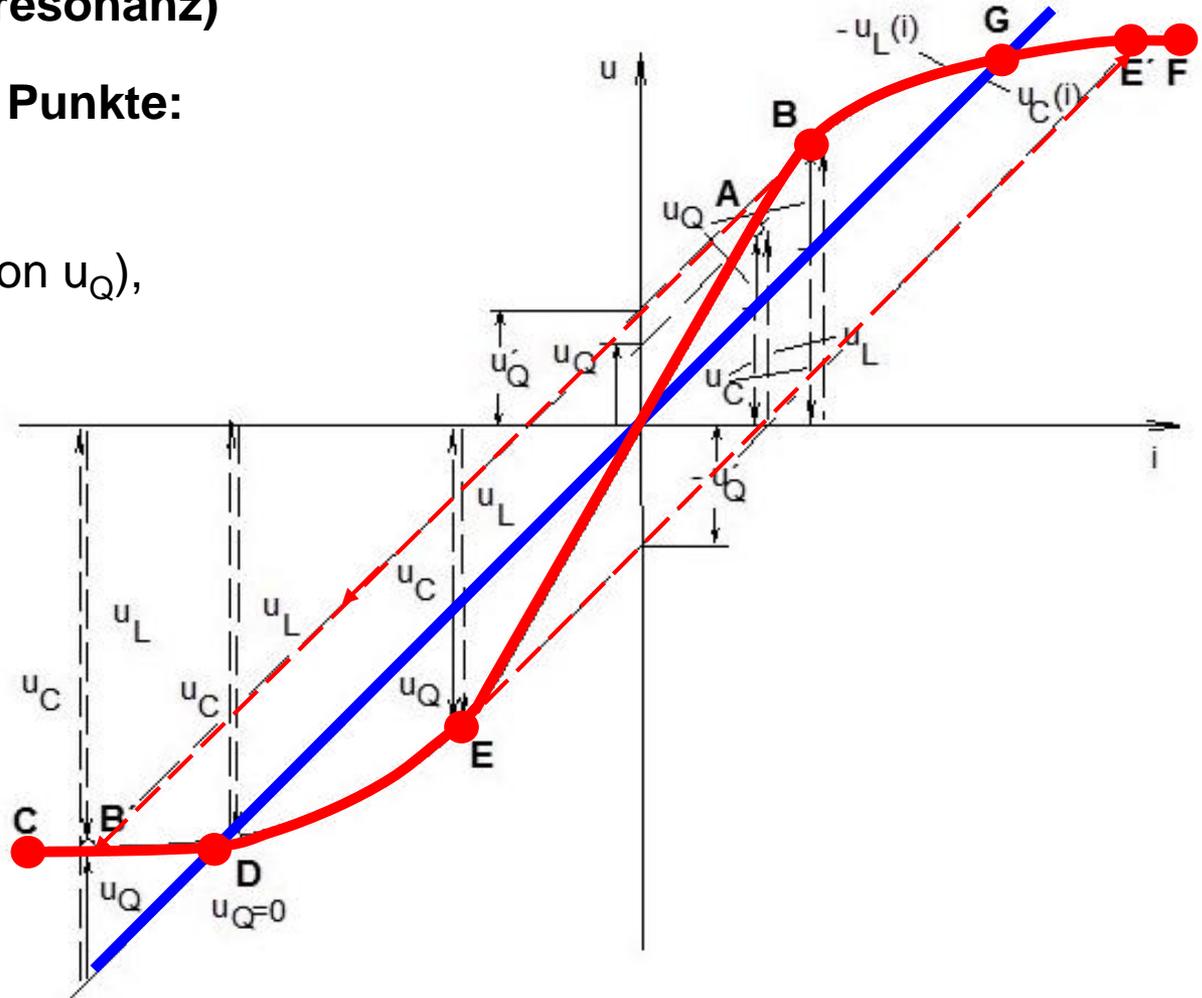


Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

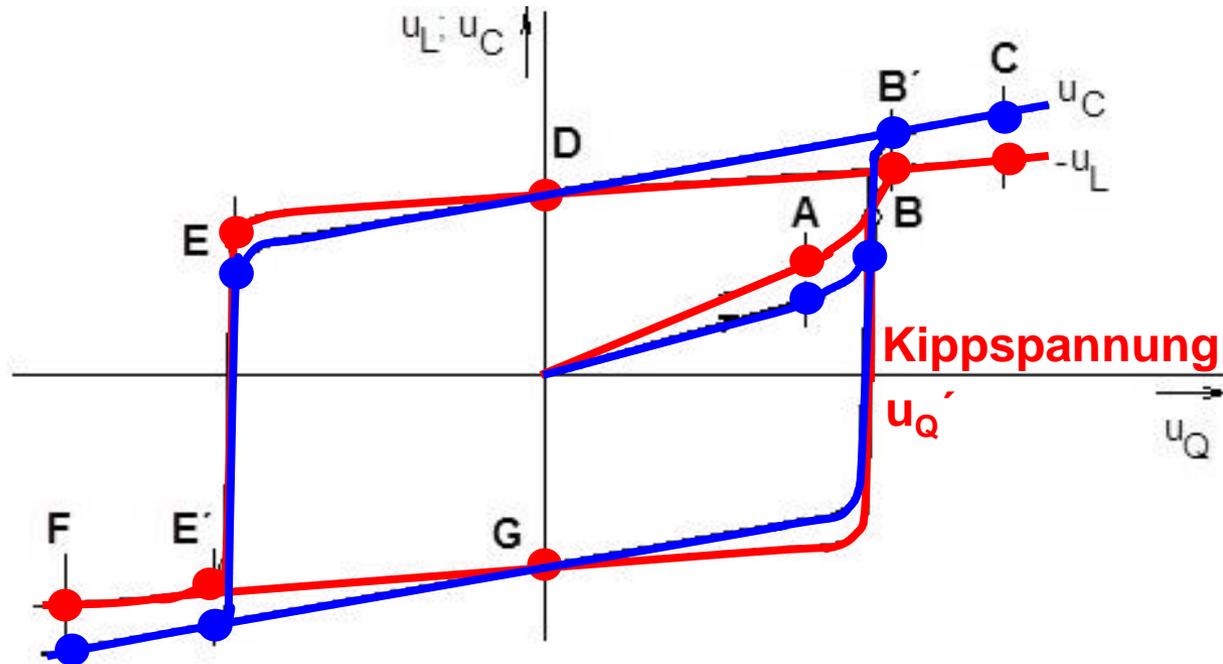
Weiterer Verlauf über die Punkte:

- C (Maximum von u_Q),
- D (Vorzeichenwechsel von u_Q),
- E - E' (Kippunkt),
- F, G usw.

Spannung u_Q' bei welcher der Punkt B gerade erreicht wird heißt **Kippspannung u_Q'** .



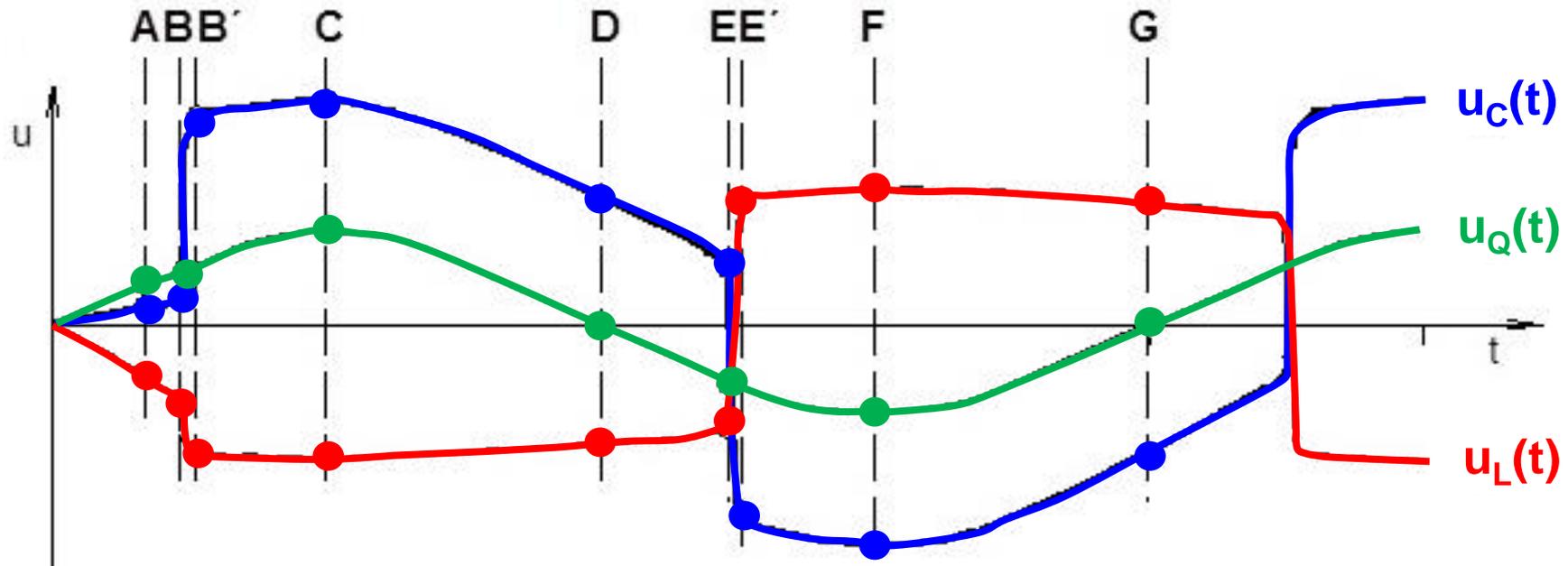
Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)



Verlauf über die Punkte:

- C (Maximum von u_Q),
- D (Vorzeichenwechsel von u_Q),
- E - E' (Kipppunkt),
- F, G usw.

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)



Verlauf über die Punkte:

- C (Maximum von u_Q),
- D (Vorzeichenwechsel von u_Q),
- E - E' (Kipppunkt),
- F, G usw.

Zeitweilige Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz Kippschwingungen (Ferroresonanz)

Auswirkung von Kippschwingungen auf die Netzspannung

- Stationäre Kippschwingungen in Drehstromnetzen sind immer Ausgleichsvorgänge über Erde, die nur die Leiter-Erd-Spannungen betreffen.
- Die verketteten Spannungen werden von den Kippschwingungen praktisch nicht beeinflusst.

Prädestinierte Netzkonfigurationen für das Auftreten von Kippschwingungen

- Meist nur in kleinen Netzen mit freiem Sternpunkt.
- Anregung durch Erdschlüsse oder Schaltvorgänge
- Besonders gefährdet sind
 - Freileitungen mit ca. 0,2 bis 10 km Länge
 - Kabel mit 3 bis 1000 m Länge,
 - Schaltzustände, bei denen das Teilnetz nur aus der Sammelschiene und angeschlossenen Wandlern besteht.

2. Elektrische Beanspruchung von Betriebsmitteln

2.2 Schaltspannungen

Schaltspannungen

Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen / Überspannungsfaktor

- **Entstehung von Schaltüberspannungen** („innere Überspannungen“)
 - durch Abschalten kleiner induktiver Ströme
 - durch Einschalten langer Leitungen
 - beim Eintritt von Erd- und Erdkurzschlüssen
- **„Überspannungsfaktor k“**
Kenngröße zur Charakterisierung transienter Überspannungen

Leiter-Erde:

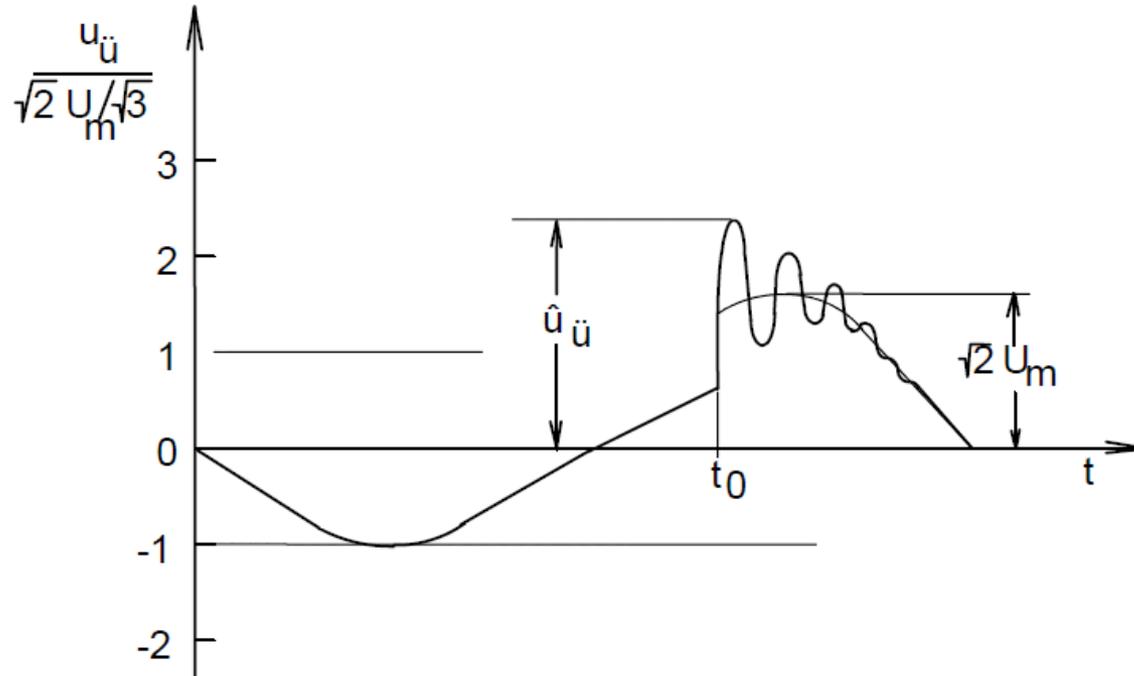
$$k_{LE} = \frac{\hat{u}_{ii}}{\sqrt{2} U_m / \sqrt{3}}$$

Leiter-Leiter:

$$k_{LL} = \frac{\hat{u}_{ii}}{\sqrt{2} U_m}$$

Schaltspannungen

Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen / Überspannungsfaktor



Bestimmungsgrößen des Überspannungsfaktors k_{LE} am Beispiel eines Erdschlusseintritts in einem Netz mit freiem Sternpunkt bei der maximal zulässigen Betriebsspannung U_m

Schaltspannungen

Transiente Überspannungen beim Einschalten langer Leitungen

Überspannungsentwicklung durch Überlagerung von

- **betriebsfrequenter Spannungsanhebung am Ende der Leitung durch den Ferranti-Effekt** und
- **transientem Anteil der am Leitungsende reflektierten Schaltspannungswanderwelle**

Transienter Anteil:

- Abhängig von der Differenzspannung im Einschaltaugenblick zwischen
- speisendem Netz und
 - der auf der Leitung anstehenden Spannung

Statistische Verteilung der Überspannungen

Zeitpunkt des Schließens der Kontakte bezüglich der Netzfrequenz ist rein zufällig

→ Auftretende Differenzspannungen Höhe der transienten Überspannungen zufällig

Höchste transiente Überspannungen:

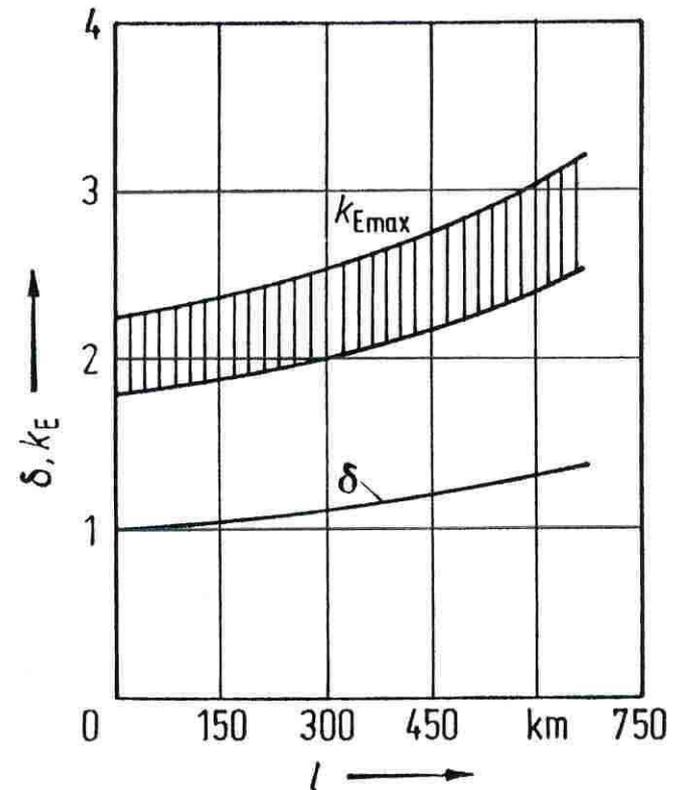
Nach Kurzunterbrechung, wenn noch Restladungen auf der Leitung sind.

Schaltspannungen

Transiente Überspannungen beim Einschalten langer Leitungen

Überspannungsfaktoren k_E und betriebsfrequente Spannungsanhebung δ am Leitungsende beim Einschalten einer 765 -kV-Leitung in Abhängigkeit von der Leitungslänge l

Streubereich bedingt durch statistische Verteilung der Differenzspannung zum Zeitpunkt des Kontaktschließens.



Schaltspannungen

Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen

- Jeder **Übergang in einen neuen stationären Zustand** ist in Systemen mit Induktivitäten und Kapazitäten immer mit transienten Ausgleichsvorgängen verbunden (z.B. bei Erdschluss, etc.)
- Die **maximalen Amplituden** hängen wesentlich ab vom
 - Zeitpunkt des Erdschlusseintritts und der
 - Sternpunktbehandlung.
- **Ungünstigster Fall bei einem Erdschluss:**
 - Erdschlusseintritt im Spannungsmaximum der fehlerbetroffenen Phase und bei
 - Vernachlässigung der Dämpfung für die erste Amplitude der Ausgleichsschwingung

Schaltspannungen

Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen

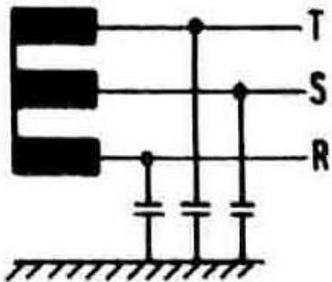
Transiente Erdschlussüberspannungen im Netz		k_{LE}
Netz mit freiem Sternpunkt	bei einfachem Erdschluss	2,5
	bei einfachem Erdschluss unter Vernachlässigung der Dämpfung	2,73
	bei intermittierendem Erdschluss	3,5
	bei intermittierendem Erdschluss unter Vernachlässigung der Dämpfung	3,73
Gelöschtes Netz	bei einfachem Erdschluss	2,5
	bei einfachem Erdschluss unter Vernachlässigung der Dämpfung	2,73

Schaltspannungen

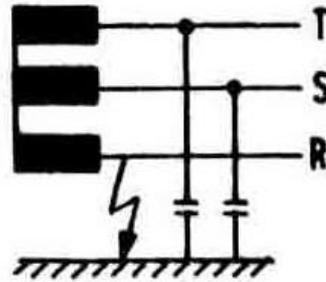
Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen

Intermittierender Erdschluss:

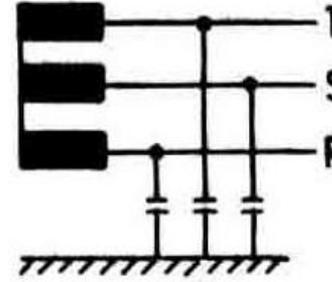
Wiederkehrendes Zünden und Erlöschen eines Erdschlusses



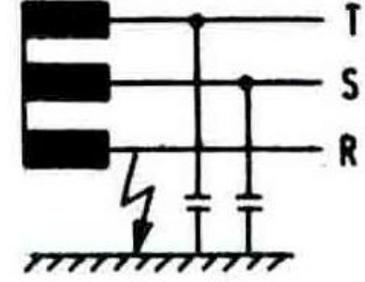
**Fehlerfreier
Netzzustand**



Erdschluss



**Fehlerfreier
Netzzustand**

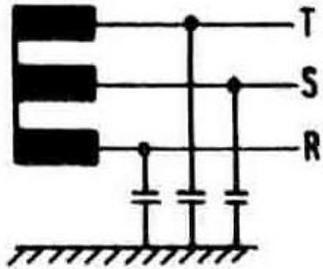


Erdschluss

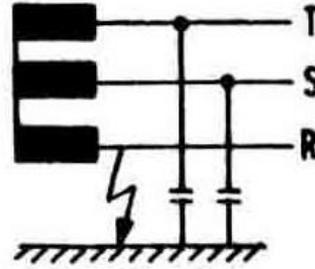
2. Spannungsbeanspruchungen von Betriebsmitteln in Netzen

Schaltspannungen

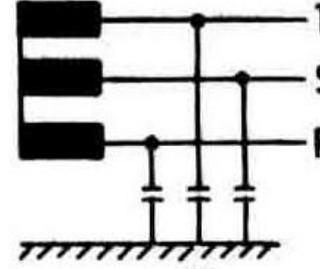
Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen



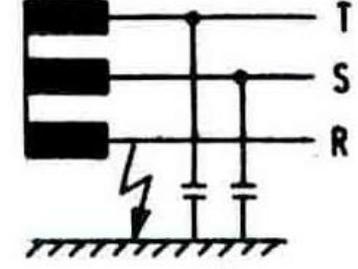
Fehlerfreier
Netzzustand



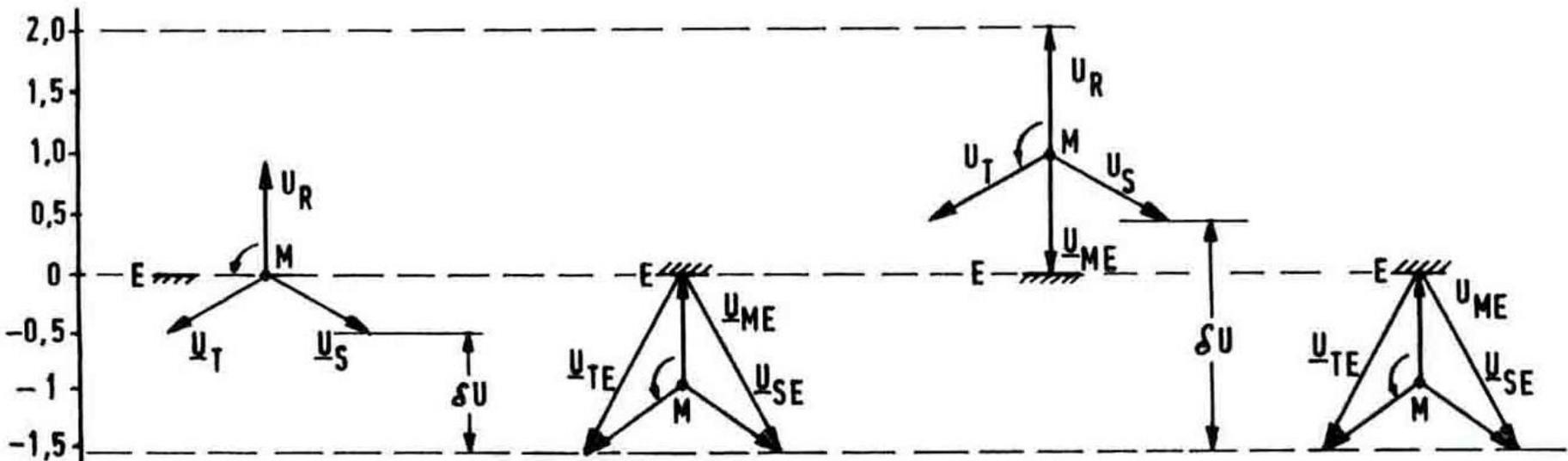
1. Erdschluss



Fehlerfreier
Netzzustand

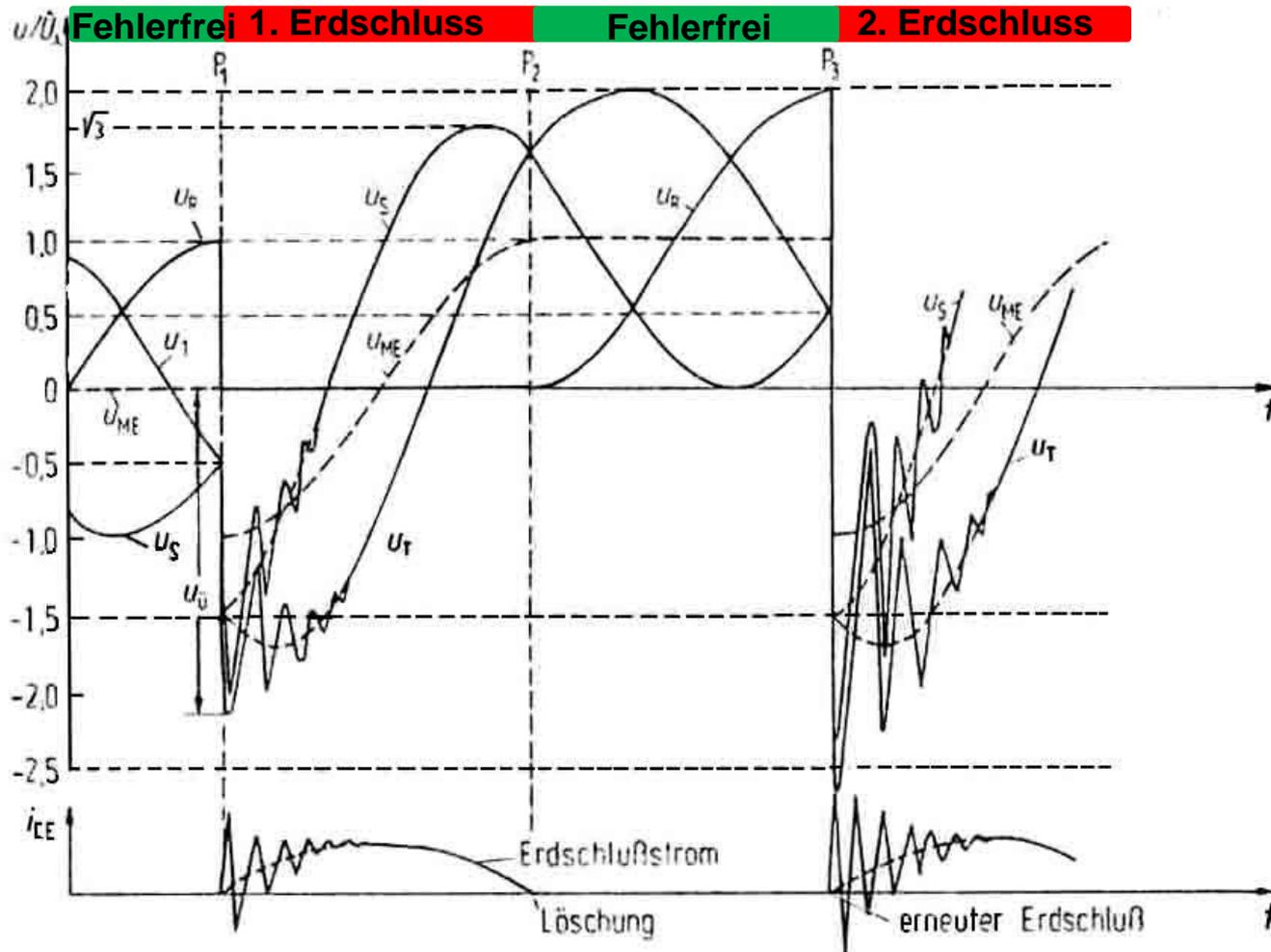


2. Erdschluss



Schaltspannungen

Transiente Überspannungen bei Erdschlüssen



Schaltspannungen

Ausschalten kleiner induktiver Ströme

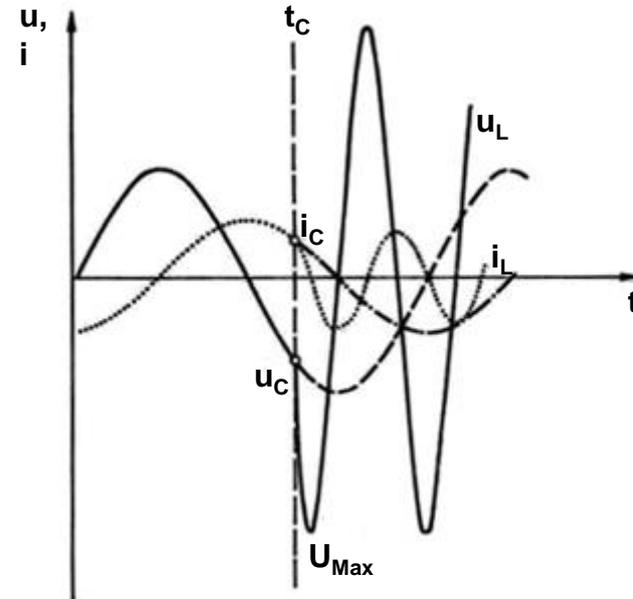
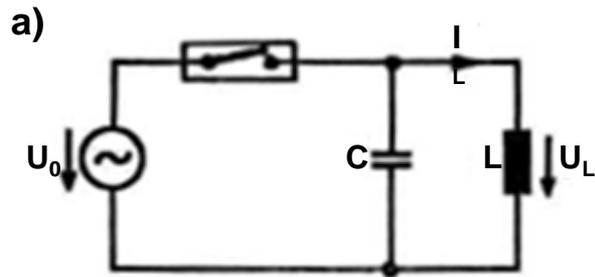
- Das Löschvermögen von Leistungsschaltern muss hauptsächlich für die Unterbrechung großer Kurzschlussströme ausgelegt sein, deshalb wird der Schaltlichtbogen bei kleinen Strömen so intensiv gekühlt, dass diese Ströme bereits vor dem natürlichen Stromnulldurchgang „abgerissen“ werden (current chopping)
- Fließt der Laststrom durch die Induktivität L , so ist in dieser zum Zeitpunkt die Energie $W_L = 0,5 \cdot L \cdot i_L^2$ gespeichert
- Bei einer ersten Abschätzung unter Vernachlässigung der Verluste, muss die gesamte in L gespeicherte Energie in die oft kleine Kapazität des abgeschalteten Betriebsmittels und dessen Zuleitung kommutieren ($W_C = 0,5 \cdot C \cdot u_C^2$) → Ausgleichsvorgang → max. Spannung

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$u_{\max} = \sqrt{u_C^2 + \frac{L}{C} i_C^2}$$

Schaltspannungen

Ausschalten kleiner induktiver Ströme



Stromabriss beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme

a) Prinzipschaltbild

b) Grundlegender Verlauf der Ströme und Spannungen

t_c Stromabriss-Zeitpunkt, i_c Momentanwert des Stromes in L zur Zeit t_c ,

u_c Momentanwert der Spannung an C zur Zeit t_c

Schaltspannungen

Ausschalten kleiner induktiver Ströme

- besondere Überspannungsgefährdung beim Abschalten kleiner induktiver Ströme für im industriellen Bereich eingesetzte Asynchronmotoren sowie mit Kompensationsdrosselpulen belastete Transformatoren
- Abschalten von anlaufenden Motoren oder Motoren mit festgebremsten Läufer ist problematisch
- Messungen an Mittelspannungsasynchronmotoren ergaben Überspannungsfaktoren k_{LE} bis ca. 8, Motoren kleinerer Leistung (ca. 70 - 120 kW) wiesen die höchsten Werte auf

Schaltspannungen

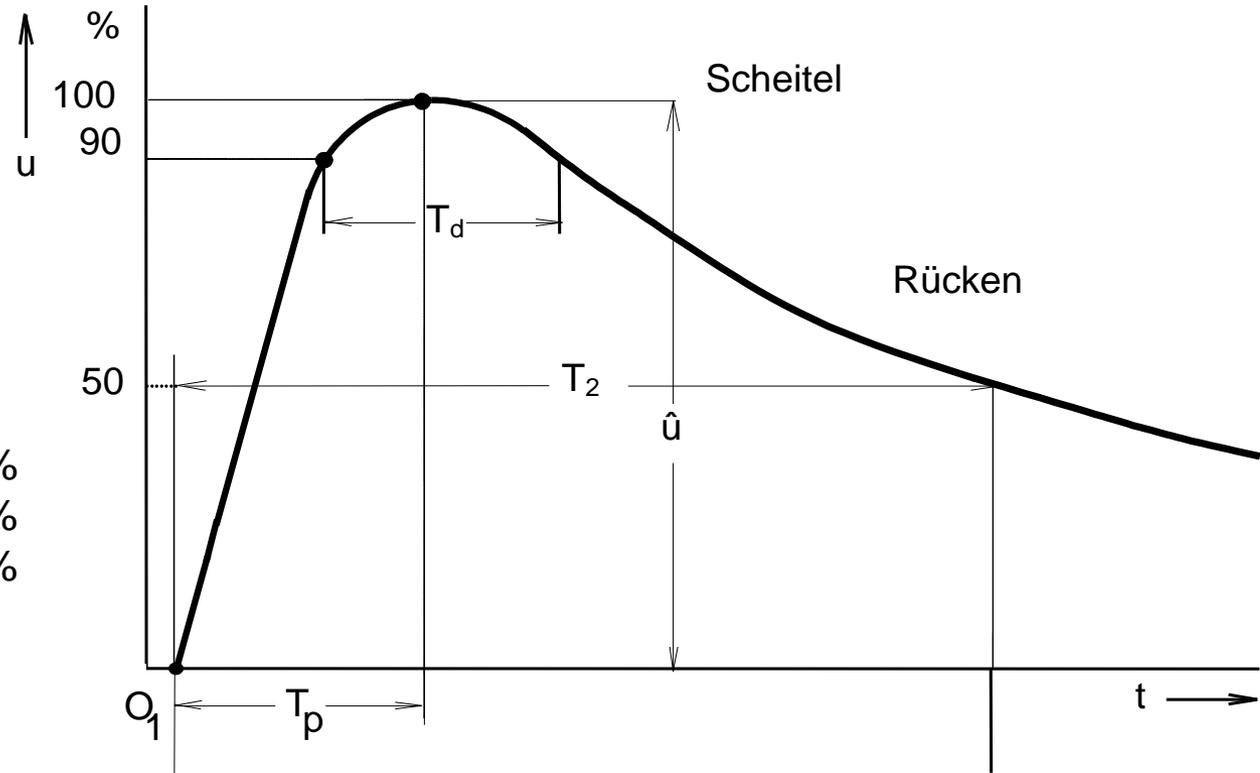
Nachbildung von Schaltspannungsbeanspruchungen (Prüfzwecke)

- **Prüftechnische Nachbildung für Schaltspannungsbeanspruchungen:**
Schwierig, aufgrund
 - der Vielfalt der Spannungs- bzw. Schwingungsformen mit unterschiedlichen Frequenzen, Steilheiten und Amplituden
 - Unterschieden in Aufbau und Isolierstoffverhalten der zu prüfenden Betriebsmittel
- **Grund zur Festlegung einer Schaltstoßspannung:**
Prüftechnischen Abdeckung des Festigkeitsminimums langer Luftstrecken bei Stirnzeiten um 200 μs .
- **Festlegung der Impulsform für Schaltspannungsprüfungen in nationalen und internationalen Normen:**

Unipolarer, aperiodischer Schaltstoßspannungsverlauf mit einer Scheitelzeit T_p von 250 μs und einer Halbwertszeit T_2 von 2500 μs .

Schaltspannungen

Nachbildung von Schaltspannungsbeanspruchungen (Prüfzwecke)



Toleranzen:

Scheitelwert \hat{u} :	$\pm 3\%$
Scheitelzeit T_p :	$\pm 20\%$
Halbwertszeit T_2 :	$\pm 60\%$

Genormte Schaltstoßspannung nach VDE 0432 Teil 1 und IEC 60 – 1)

2. Elektrische Beanspruchung von Betriebsmitteln

2.3 Blitzüberspannungen

Blitzüberspannungen

Allgemeines

- **Blitzentladung:** Ladungsausgleich zwischen Raumladungswolken oder Raumladungswolken und Erde
- **Raumladungswolken entstehen durch Aufwinde** bei hoher Luftfeuchtigkeit
- Für die Beanspruchung der Isolation von Betriebsmitteln durch Blitze sind folgende Parameter entscheidend:
 - Amplitude des Blitzstromes
 - Polarität der Entladung
 - Zeitlicher Verlauf des Blitzstromes (z.B. Steilheit, Ladungsmenge, multiple Entladungen)

Blitzüberspannungen

Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken

Der Ladungstrennungsmechanismus in Gewitterwolken ist noch nicht abschließend geklärt – vermutlich sind mehrere Mechanismen an der Ladungsentstehung beteiligt.

Zu den zwei verbreitetsten Theorien zählen:

- **Unterkühlungseffekt (Workman & Reynolds)**

- Experimentell nachweisbar durch Wassertropfen auf eine unterkühlte Kupferplatte (-5 bis -30 °C)
- Es kommt zur Bildung von Eiskristallen auf der Platte.

Abspringende Eiskristalle sind positiv geladen → Ladungstrennung

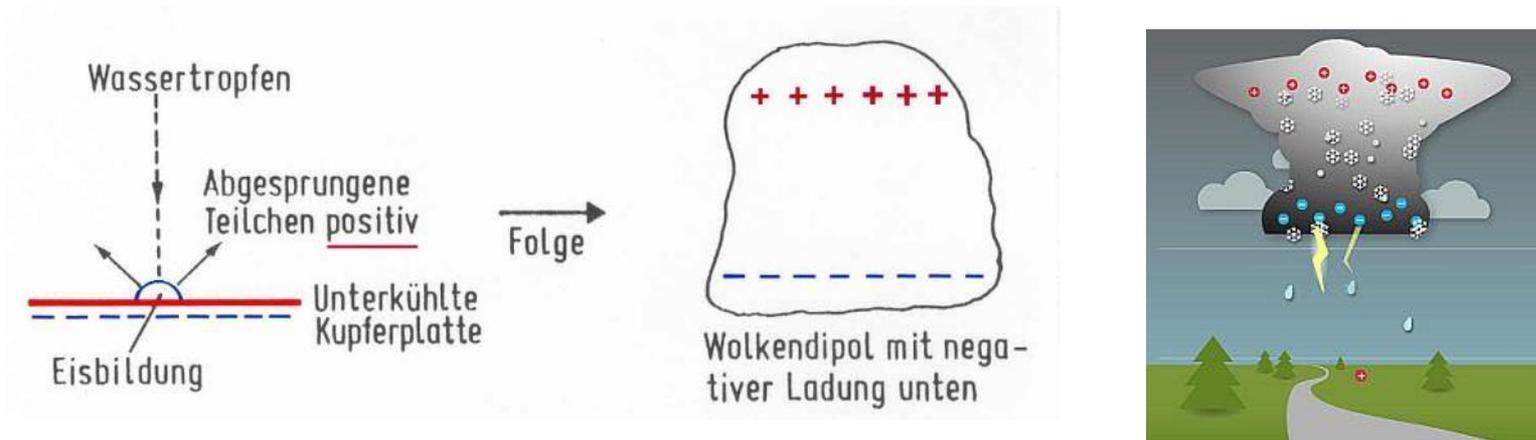
- **Zerknalleffekt**

- Zerplatzen von Eiskristallen während des Gefrierens aufgrund von Ausdehnungs- und Stoßvorgängen. → Ladungstrennung

Blitzüberspannungen

Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken

Unterkühlungseffekt



Ladungstrennung bei der Wolkenbildung durch den Unterkühlungseffekt

Blitzüberspannungen

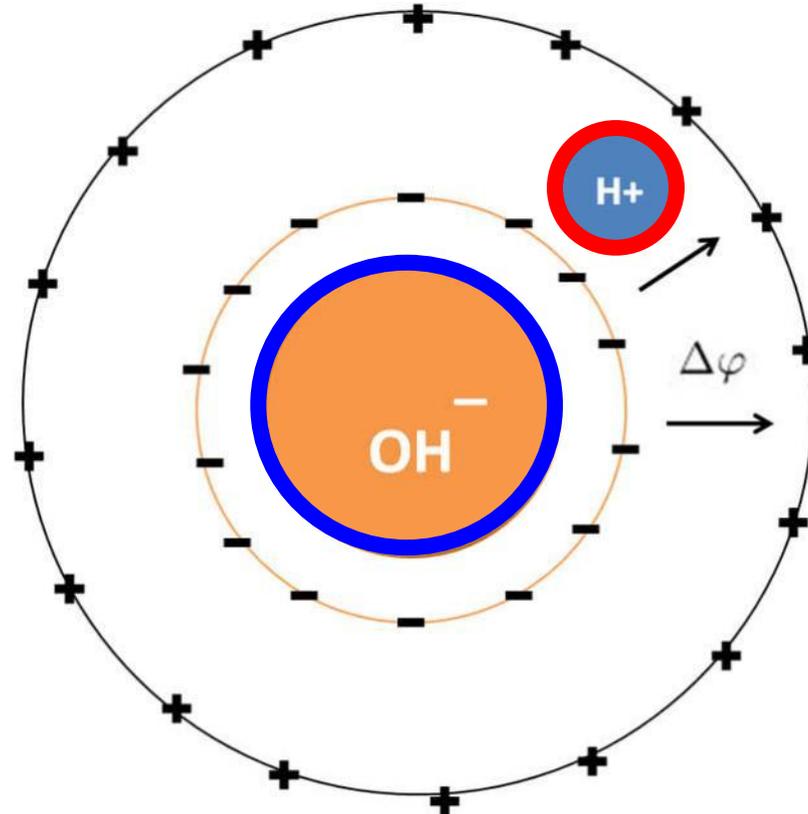
Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken

Zerknallegeffekt

- Bei diesem Effekt geht man von einem unterkühlten Eiskristall aus, dessen äußere Schale bereits verfestigt ist, im Inneren jedoch noch Wasser enthält.
- In dieser Konfiguration wandern die beweglichen H^+ -Ionen nach außen und laden die Eishülle positiv auf, die trägeren OH^- -Ionen verbleiben im Kern.
- Beim Gefrieren platzt der sich ausdehnende Kern, OH^- -Ionen fallen nach unten, die kleinen Eiskristalle der Randzone (H^+ -Ionen) werden durch Aufwind in die oberen Wolkenbereiche befördert

Blitzüberspannungen

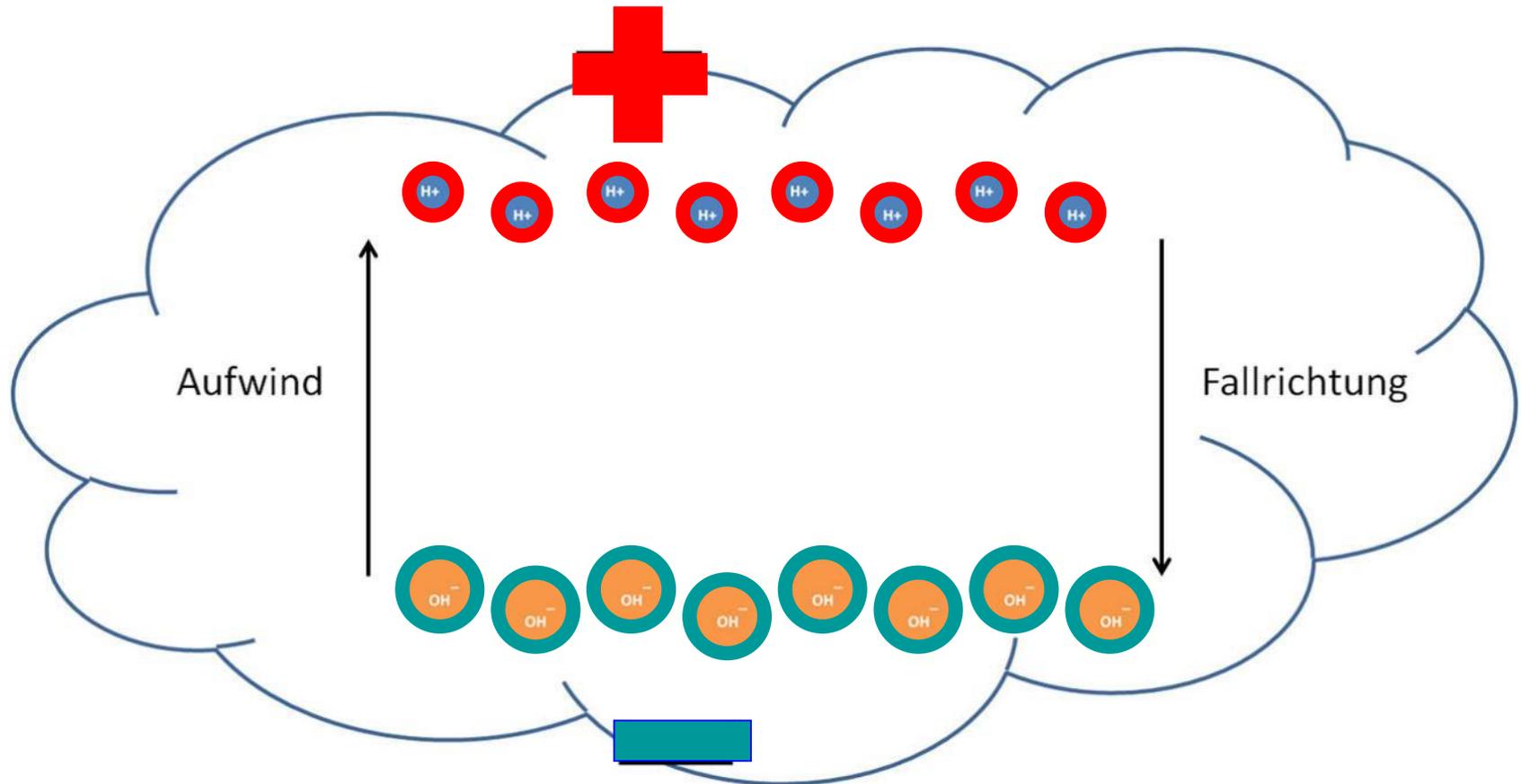
Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken



Ladungstrennung bei der Wolkenbildung (Zerknalleffekt)

Blitzüberspannungen

Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken



Ladungstrennung bei der Wolkenbildung (Zerknalleffekt)

Blitzüberspannungen

Ladungsentstehung und -verteilung in Gewitterwolken

Ladungs- und Feldverteilung

- Messungen ergaben, dass sich **positive Ladungsschwerpunkte** bei Gewitterwolken vorwiegend bis zu einer **Höhe bis ca. 12 km** (Temperaturen bis ca. -40 °C) befinden.
- **Negative Ladungsschwerpunkte** befinden sich hingegen vorwiegend in einer **relativ konstanten Höhe von etwa 5 km**
- Gewitterwolken lassen sich stark vereinfacht als vertikaler Dipol darstellen
→ aufgrund der Ladungsverteilung tragen die meisten Wolke-Erde-Blitze negative Ladungen.

Blitzüberspannungen Blitzentladungen

- Voraussetzung für einen Blitz ist das Überschreiten eines Feldstärke-Grenzwertes zwischen Ladungszentren von mehreren kV/cm (lokale Feldstärke)
- Unter diesen Bedingungen kann es zu folgenden Entladungen kommen:
 - Wolke → Wolke
 - Wolke → Erde
 - Erde → Wolke
- Voraussetzung für Erde-Wolke-Blitze sind stark feldverzerrende Strukturen wie z.B. Türme, Masten, Papierdrachen etc.



Blitzüberspannungen Blitzentladungen

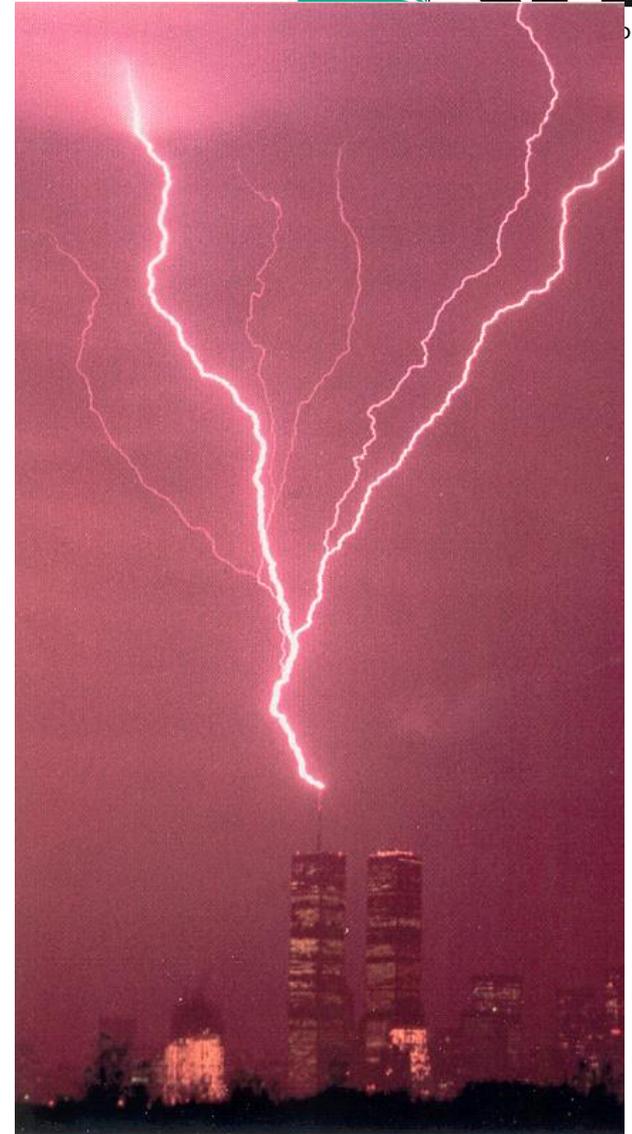
Wolke-Wolke-Blitz



2. Spannungsbeanspruchungen von Betriebsmitteln in Netzen

Blitzüberspannungen Blitzentladungen

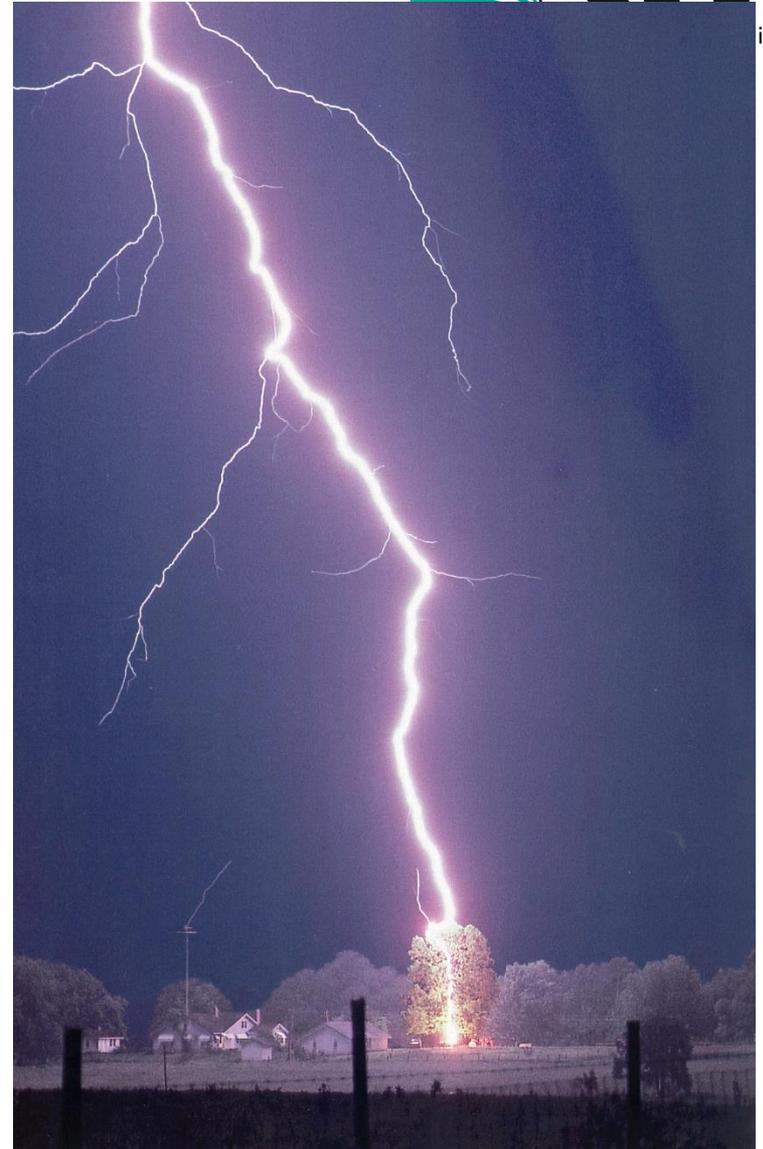
**Erde-Wolke-Blitz von einem der Türme
des World Trade Centers**



2. Spannungsbeanspruchungen von Betriebsmitteln in Netzen

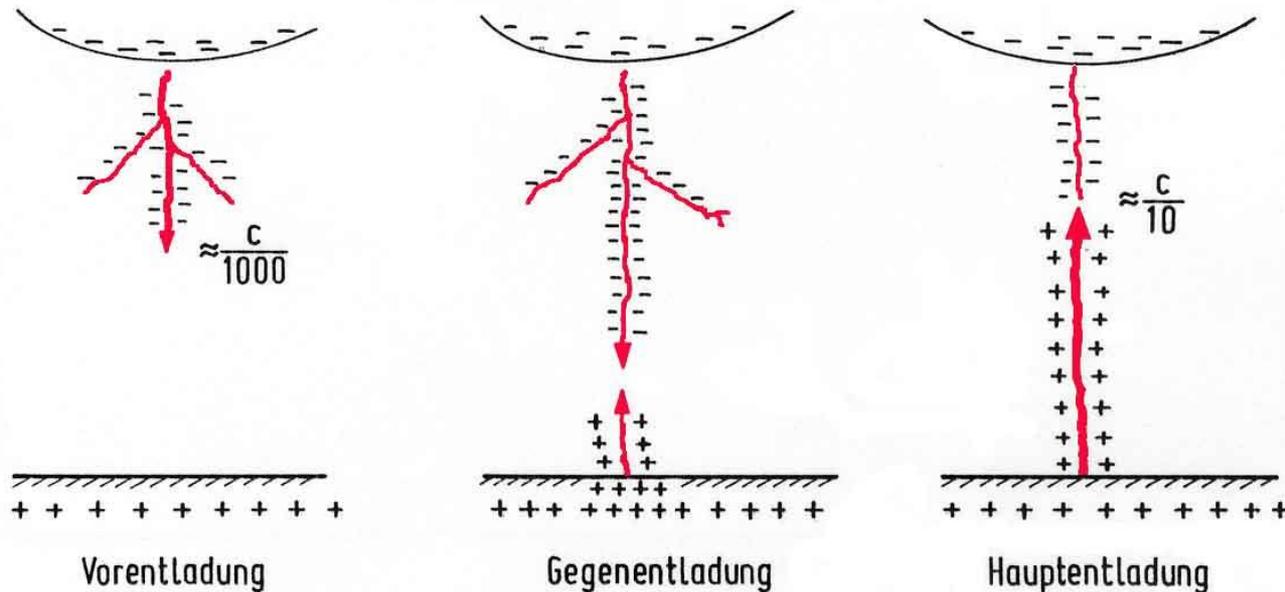
Blitzüberspannungen Blitzentladungen

**Wolke-Erde-Blitz in einen
Baum mit mehreren Fangentladungen**



Blitzüberspannungen Blitzentladungen

- **Wolke-Erde-Blitze** stellen vor allem bei ebenem Gelände die häufigste Art der Blitze zwischen Wolke und Erdoberfläche dar.
- **3 Hauptphasen:**



Zeitlicher Verlauf von Blitzentladungen ($c = 300.000 \text{ km/s}$)

Blitzüberspannungen

Blitzentladungen

- Zunächst schiebt sich ein ionisierter, dünner Kanal aus dem Ladungszentrum der Wolke in sogenannten „**Ruckstufen**“ Richtung Erde
($v \cong 300 \text{ km/s} \approx c / 1000$)
- Bei der Annäherung an die Erde steigt die Feldstärke an Strukturen auf der Erdoberfläche an,
 - ➔ Lokale Überschreitung der elektrische Festigkeit der Luft
 - ➔ Ausbildung einer einige 10 m langen „**Fang- oder Gegenentladung**“
- Nach dem Zusammentreffen der beiden Entladungskanäle findet der Ladungsausgleich in einem **hochionisierten Plasmakanal** mit $c / 10$ etwa innerhalb von einigen 10 - 100 μs statt.
- Ca. 80 % der Wolke-Erde-Blitze transportieren negative Ladung zur Erde.

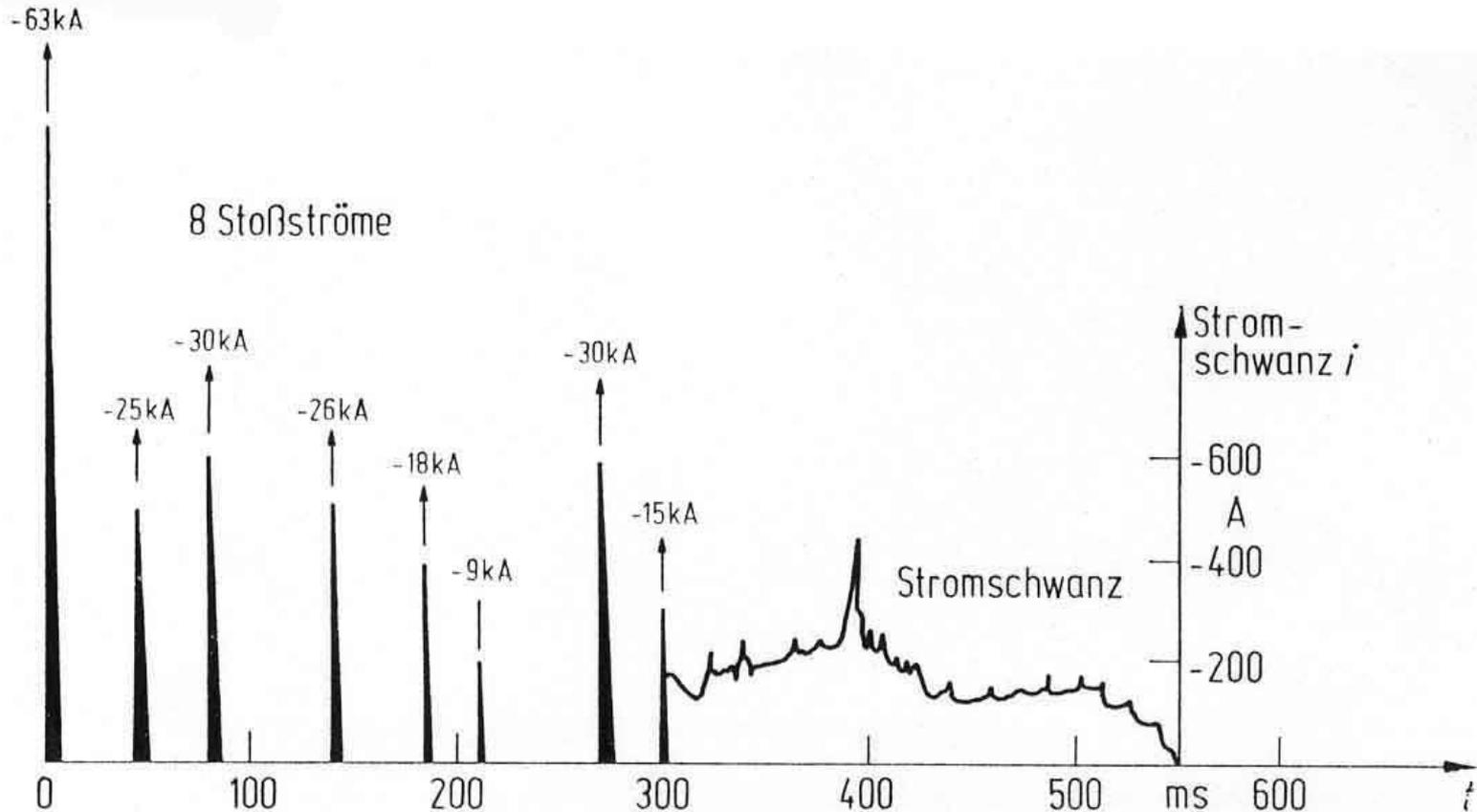
Blitzüberspannungen

Blitzentladungen / Charakteristika

- Ladung & Zeitdauer negativer Blitze \ll Ladung & Zeitdauer positiver Blitze
- Negative Wolke-Erde-Blitze weisen meist Mehrfachentladungen auf
- Zweite, dritte und weitere Entladungen (bis zu 40) von Mehrfachblitzen finden hochleitfähige Entladungskanäle vor
 - Ladungsausgleich mit wesentlich höherer Geschwindigkeit ($c/100$ bis $c/10$)
 - Ladungsausgleich ohne merkliche Ruckstufen
- Positive Blitze neigen nicht zur Ausbildung von Mehrfachblitzen, weisen aber gegenüber negativen Entladungen meist erheblich höhere Ladungsmengen (10 – 100 As) auf.
- Häufig wurden in Folge von Aufwärtsblitzen auch Abwärtsblitze im gleichen Entladungskanal beobachtet.

Blitzüberspannungen

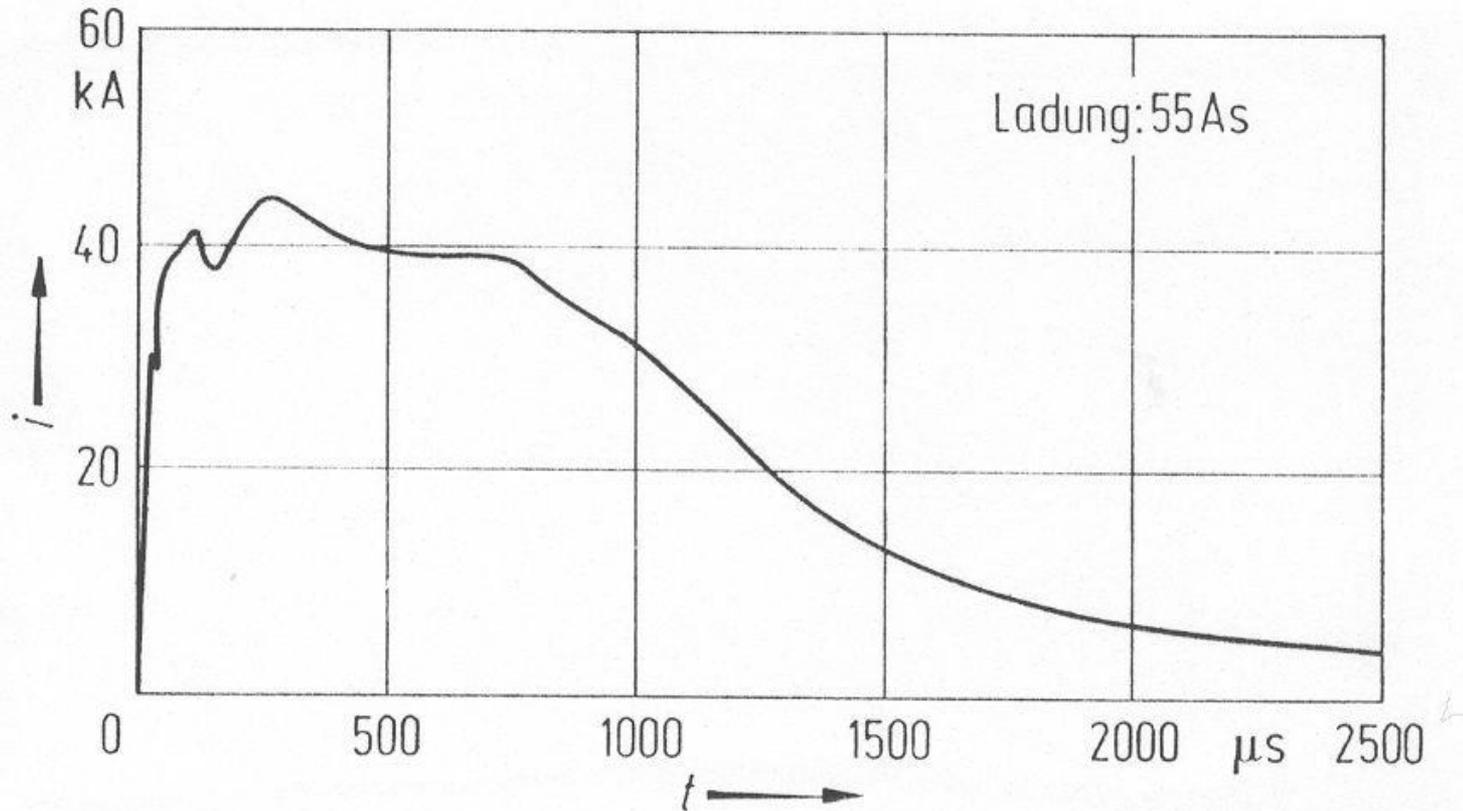
Blitzentladungen / Charakteristika



Blitzstromverlauf eines negativen Wolke-Erde-Blitzes

Blitzüberspannungen

Blitzentladungen / Charakteristika



Blitzstromverlauf eines positiven Wolke-Erde-Blitzes

Blitzüberspannungen

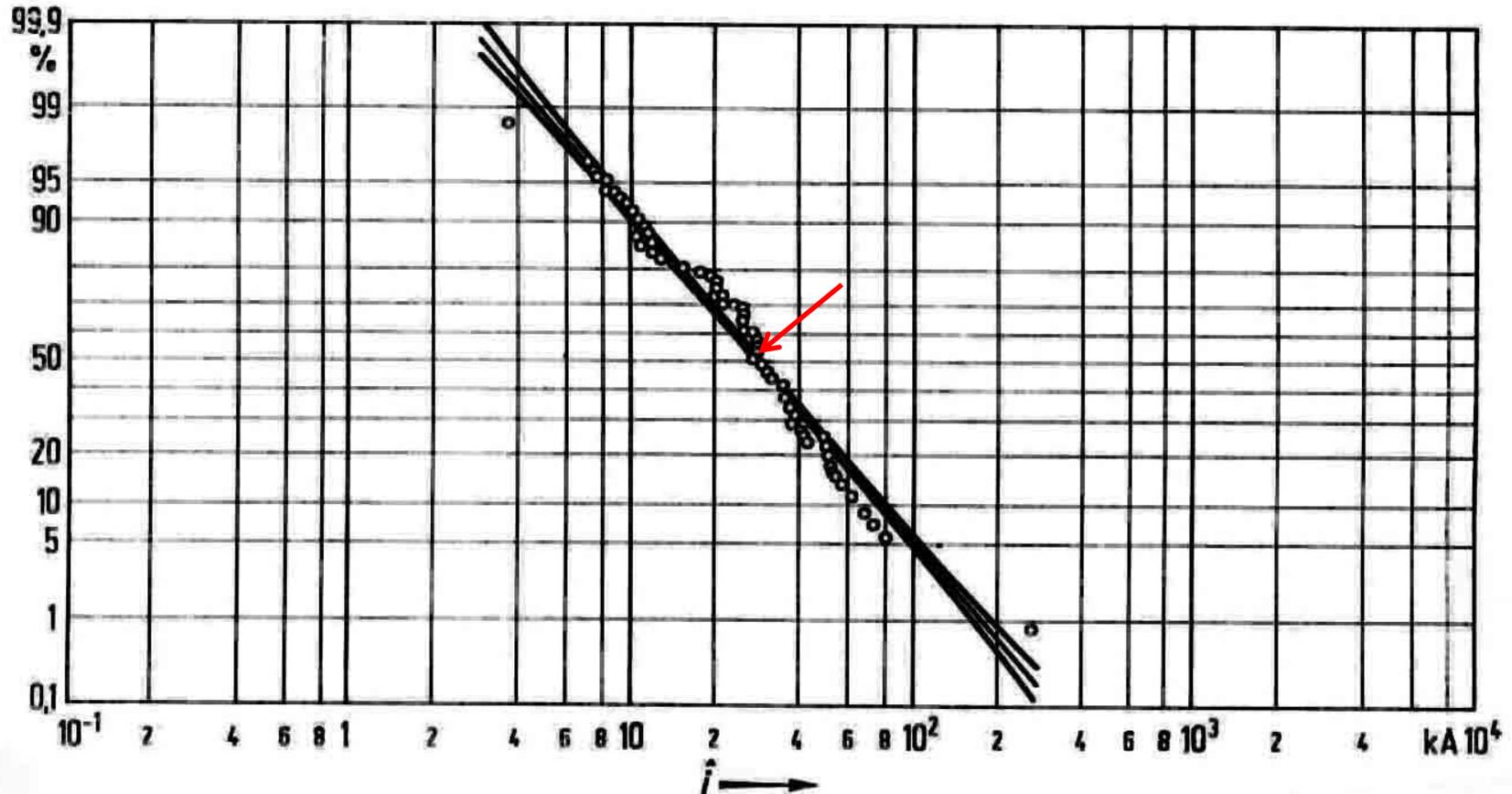
Blitzentladungen / Wichtige Parameter von Blitzen

- **Scheitelwert des Blitzstromes \hat{i}** ,
Bestimmt Spannungsabfall am Erdungswiderstand und somit Potentialanhebungen in einer Anlage
(z.B. für rückwärtige Überschläge auf Freileitungen maßgebend)
(50%-Wert der Blitzströme: ca. 30 kA Maximale Blitzströme: ca. 300 kA)
- **$\int i \, dt$ -Wert (Ladung)** des Blitzstromes bewirkt Abschmelzungen
- **di/dt Wert (Steilheit)**
Maßgebend für die induzierten Spannungen in umgebende Leiter
(50%-Wert der Blitzstromsteilheiten: ca. 30 kA/ μ s)
Maximale Blitzstromsteilheiten: ca. 100 kA/ μ s)
- **$\int i^2 \, dt$ (Stromquadrat-Zeitintegral)**
Bestimmt vor allem die Erwärmung blitzstromdurchflossener Leiter

¹⁾ Messungen am Luganer See / Schweiz (Prof. K. Berger)

Blitzüberspannungen

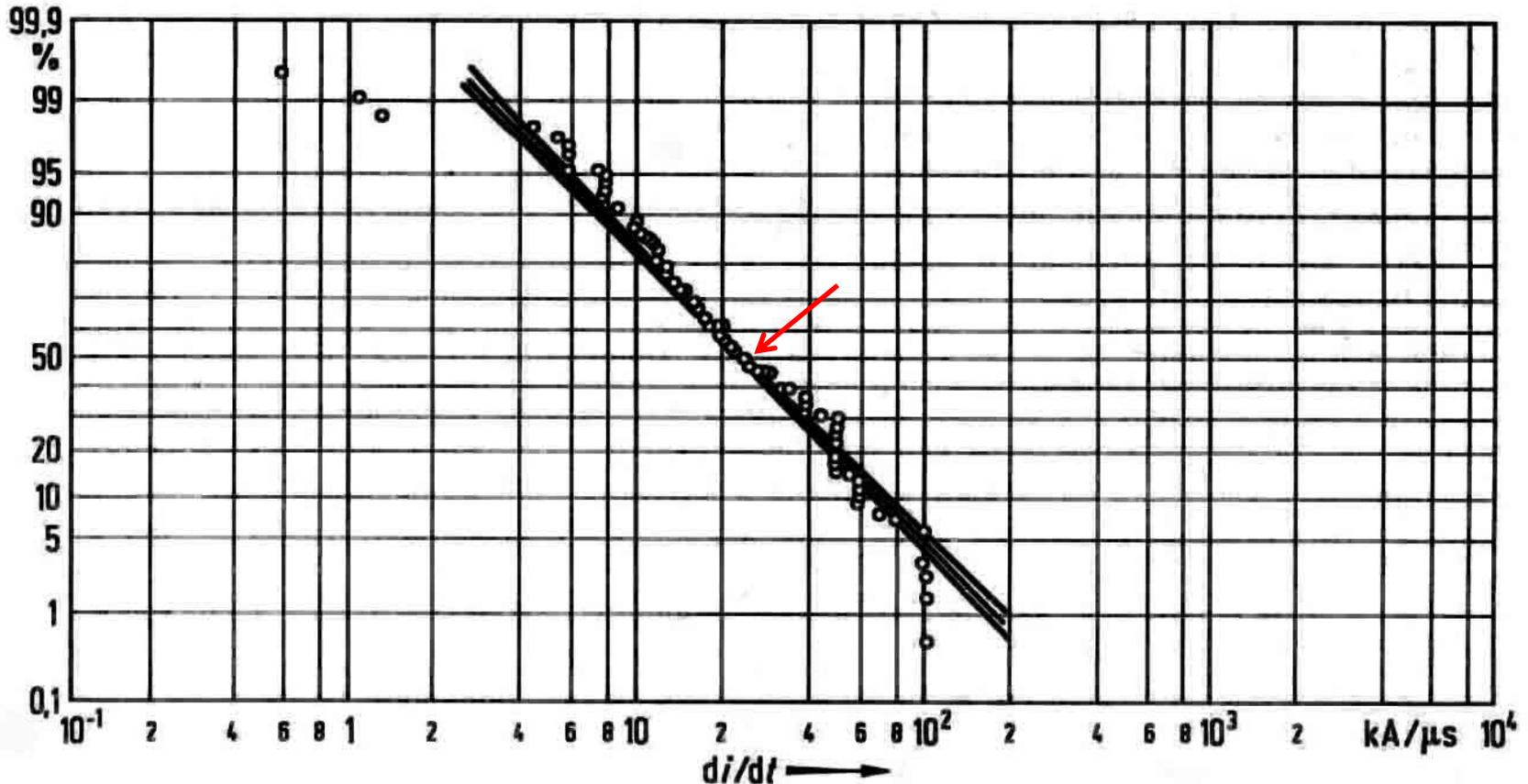
Blitzentladungen / Wichtige Parameter von Blitzen



Häufigkeitsverteilung der Scheitelwerte von Blitzentladungen
(K. Berger: Extreme Blitzströme und Blitzschutz; Bull. SEV /VSE 71 (1980) 460)

Blitzüberspannungen

Blitzentladungen / Wichtige Parameter von Blitzen

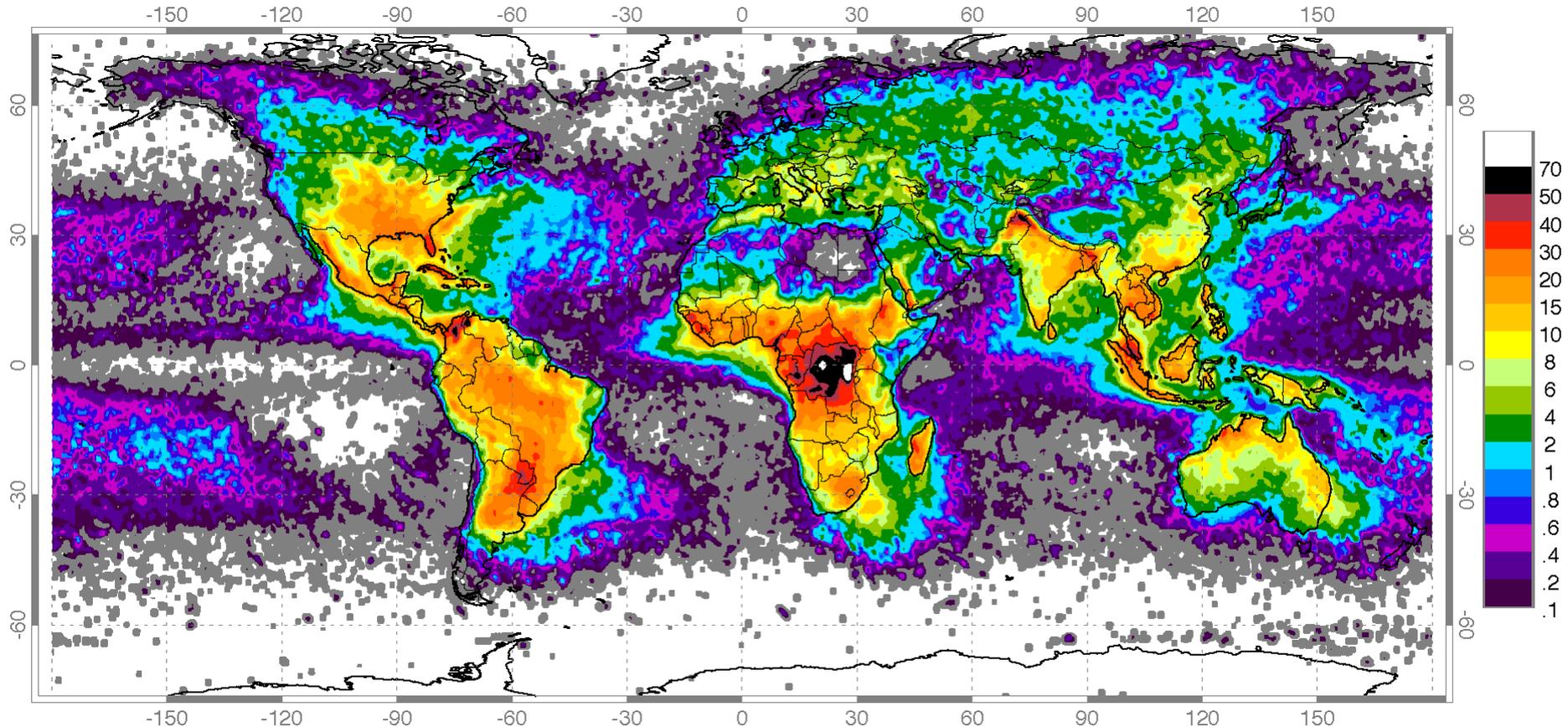


Häufigkeitsverteilung der di/dt -Werte von Blitzentladungen

(K. Berger: Extreme Blitzströme und Blitzschutz; Bull. SEV /VSE 71 (1980) 460)

Blitzüberspannungen

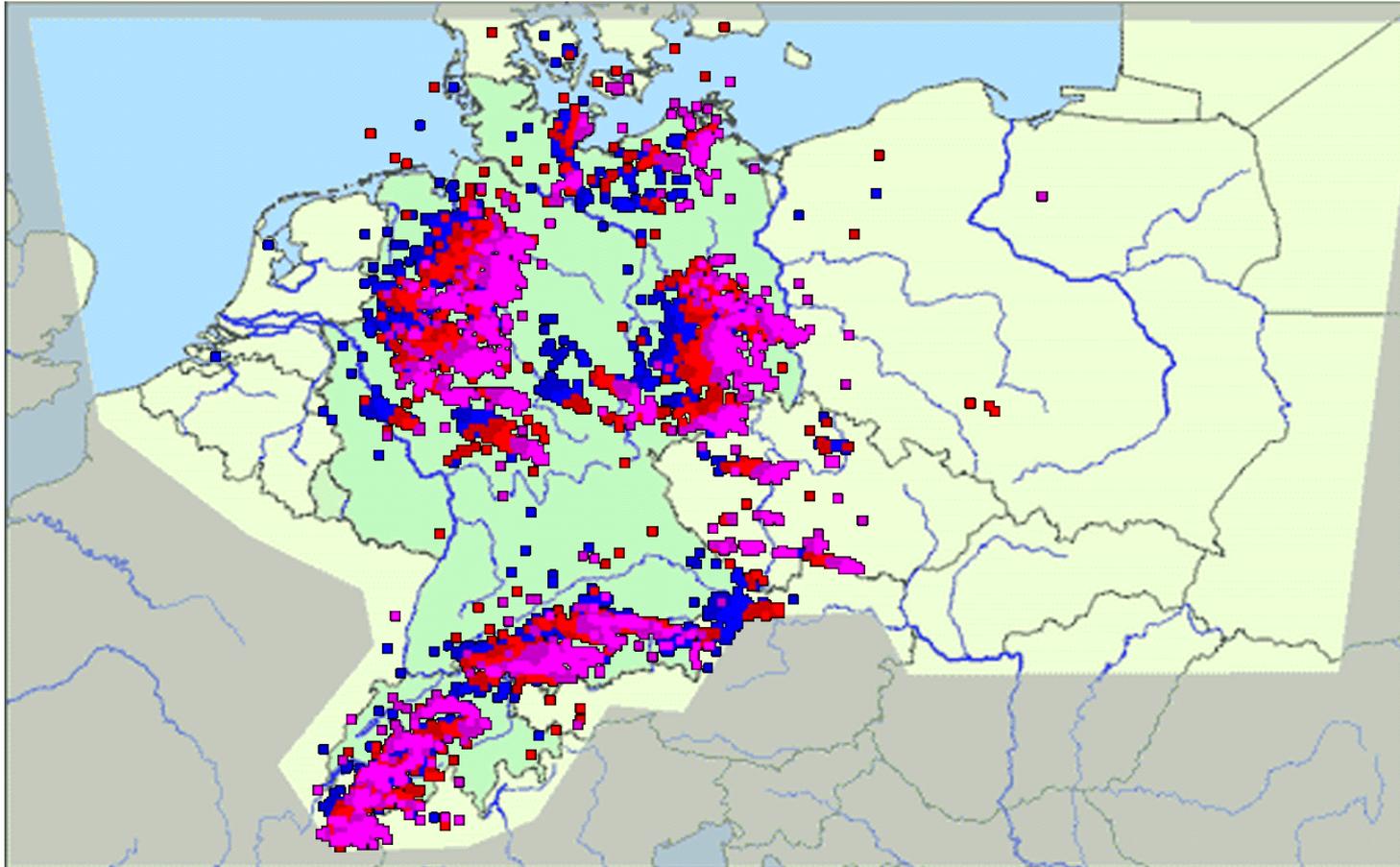
Blitzentladungen / Weltweite Häufigkeitsverteilung von Blitzen



Globale Verteilung der Blitzhäufigkeit in jährlichen Einschlägen pro km²
(NASA, 2001)

Blitzüberspannungen

Gewitteraktivität in Deutschland an einem gewitterreichen Tag



Blitzerfassungssystem BLIDS / Fa. Siemens

Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen

Art	Ablauf und Charakteristika
Direkter Leiterseileinschlag	<ul style="list-style-type: none">• Bei einem Wolke-Erde-Blitz mit Fangentladung direkt vom Leiterseil aus → Einspeisung des Blitzstromes direkt ins Leiterseil• Blitzstromaufteilung in beide Laufrichtungen in Form einer Wanderwelle• Spannungsimpuls: $u(t) = 0,5 \cdot i(t) \cdot Z_{W,F}$• Bei Wellenwiderstandswerten von $Z_{W,F} = 250 - 450 \Omega$, → Spannungen im Megavoltbereich• Isolation der Freileitung ist kaum gefährdet da es an der selbstheilenden Isolation von Lichtbogenarmaturen der Isolatoren gezielt zu Überschlägen kommt → gleichzeitige Überspannungsbegrenzung

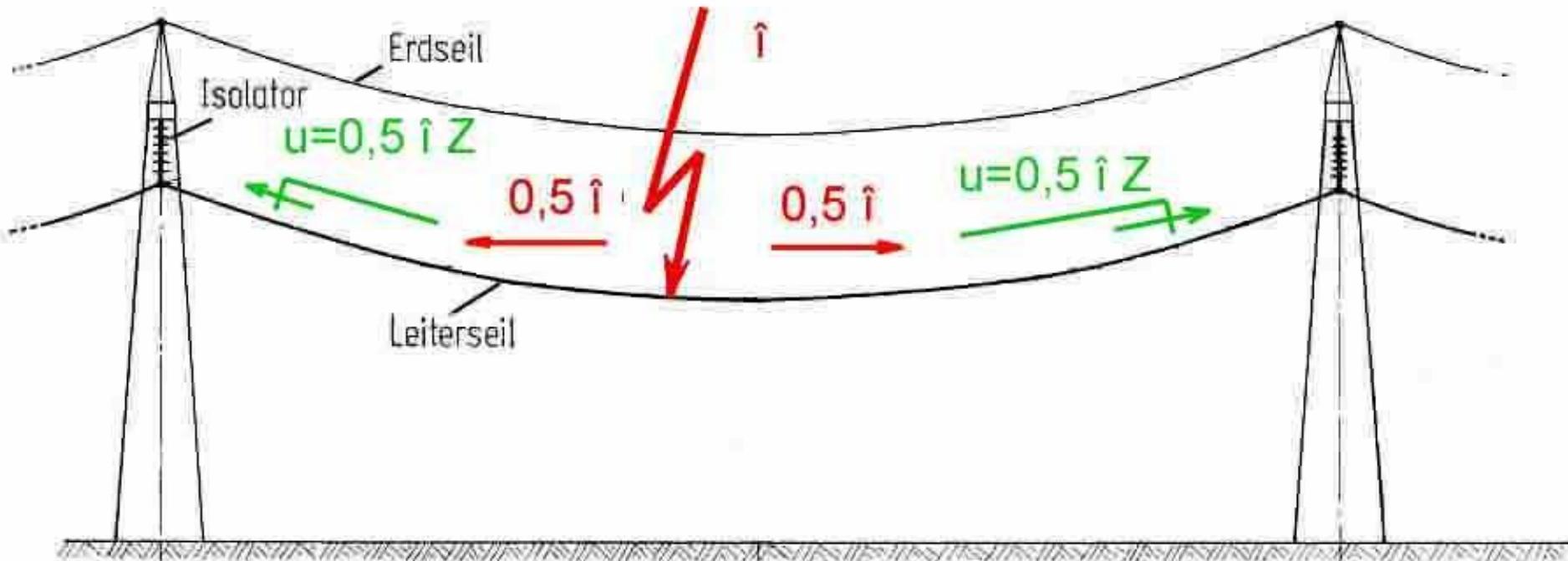
Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen

Art	Ablauf und Charakteristika
Direkter Leiterseileinschlag	<ul style="list-style-type: none">• Überschlag an Isolatorkette → Lichtbogenkurzschluss → meist durch „Kurzunterbrechung“ beseitigt• Bei Naheinschlägen an Schaltanlagen sehr hohe Gefährdung (z.B. Transformatoren) aufgrund großer Spannungssteilheit und Amplituden• Abhilfe:<ul style="list-style-type: none">→ Begrenzung der Überspannungen durch Überspannungsableiter→ Verhinderung direkter Leiterseileinschläge durch Erdseile (In der Nähe von Schaltanlagen sogar 2 Erdseile)

Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen



Direkter Leiterseileinschlag mit beidseitig ablaufenden Wanderwellen

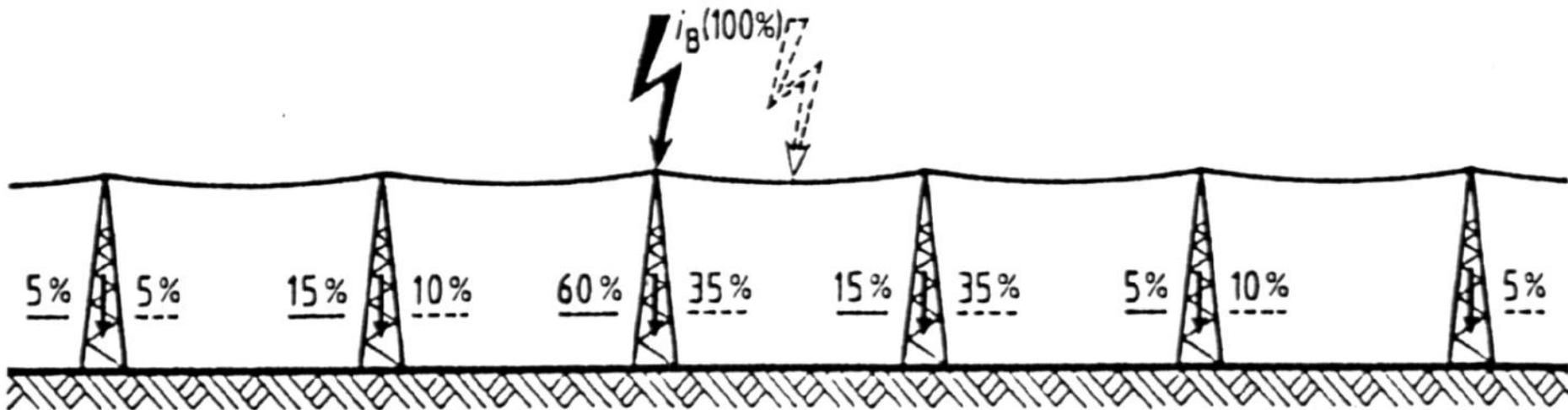
Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen

Art	Charakteristisch dafür:
Rückwärtige Überschläge	<ul style="list-style-type: none">• Vor allem bei hohen Erdungswiderständen von Freileitungsmasten im Fall eines Einschlags in das Erdseil• Die sich auf dem Erdseil ausbreitende Wanderwelle trifft auf den Wellenwiderstand und den Erdübergangswiderstand \underline{Z}_E des Mastes• Blitzstrom bewirkt Spannungsanhebung U_E des Mastes• Wird Spannungsfestigkeit der Leiterisolation (Isolatorkette) überschritten<ul style="list-style-type: none">→ rückwärtiger Überschlag auf das Leiterseil mit extrem hoher Stirnsteilheit→ Ausbreitung als Wanderwelle→ Gefährdung z.B. von Transformatoren

Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen



Stromaufteilung auf benachbarte Masten nach einem Masteinschlag bzw. einem Einschlag in das Erdseil in Spannfeldmitte (Annahme gleicher Erdübergangswiderstände)

Blitzüberspannungen

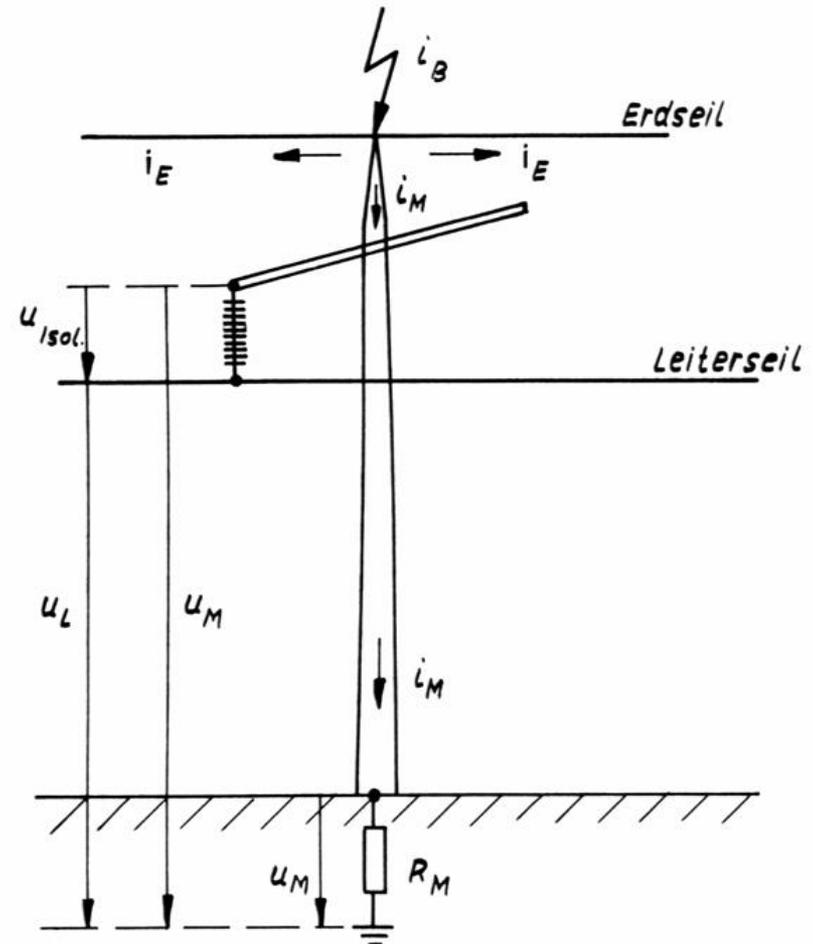
Entstehung von Blitzüberspannungen

- $i_B = 2 \cdot i_E + i_M$
- $u_M = i_M \cdot R_M$
- $u_{\text{Isol.}} = u_M - u_L$

Bei ungünstiger Phasenlage:

- $u_{\text{Isol.}} = u_M + |u_L|$

Falls $u_{\text{Isol.}} > u_{\ddot{u}, \text{ Sto\ss}}$ → **Überschlag**



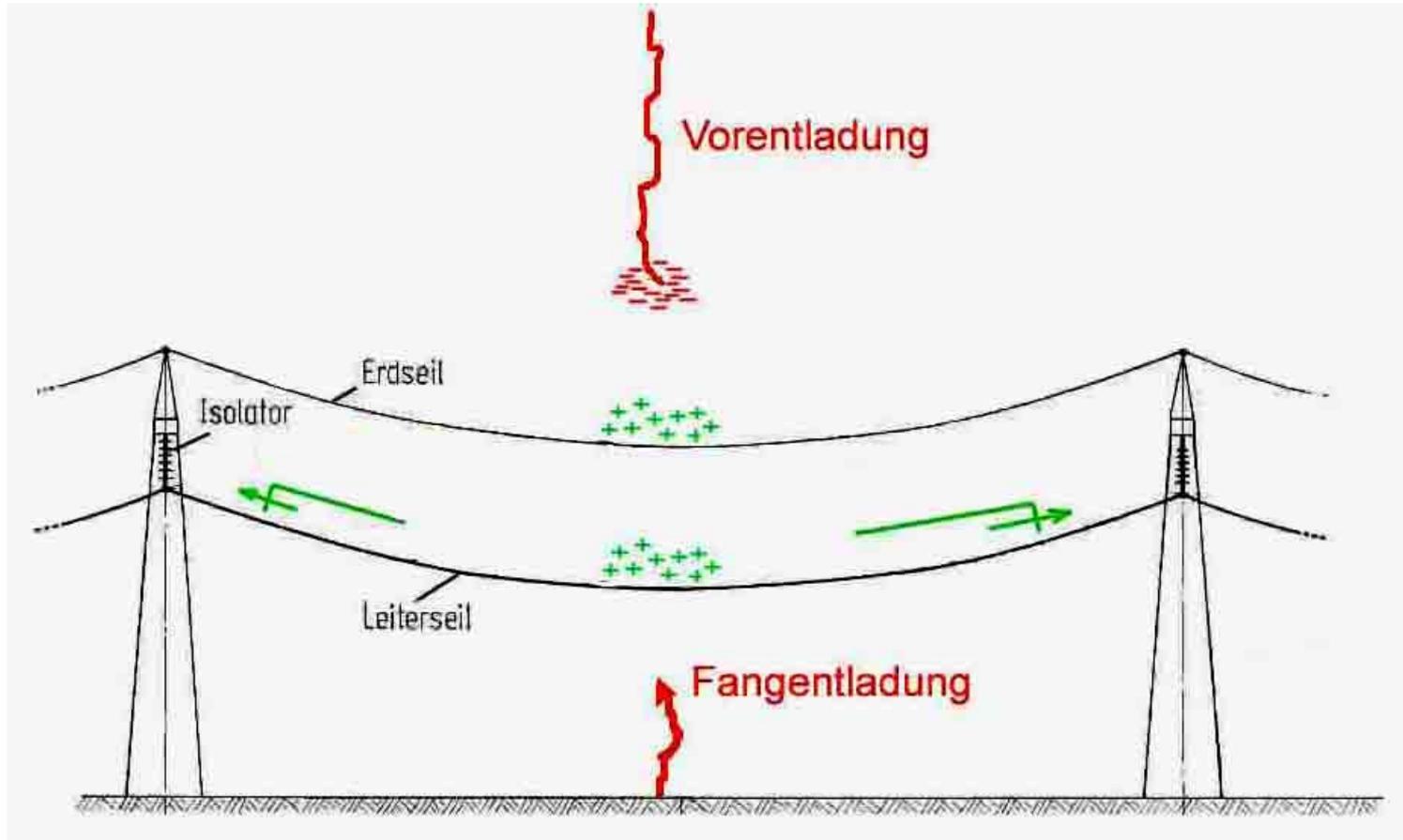
Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen

Art	Charakteristisch dafür:
Indirekte Blitz-einschläge	<ul style="list-style-type: none">• Ähnlicher zeitlicher Verlauf wie direkte Einschläge aber erheblich geringere Amplituden (bis ca. 150 kV)• Isolationsgefährdung nur in Mittel- und Niederspannungsnetzen• Charakteristisch sind die gleiche Polarität und der zeitliche Verlauf in allen Leitern bzw. Phasen der Freileitung• Bilden weitaus größten Teil der durch Blitze verursachten Überspannungen• Influenz von Ladungen auf die Freileitung kurz vor leitungsnahe Blitzschlag in die Umgebung<ul style="list-style-type: none">→ Gegenladung der Vorentladung entfällt durch schlagartigen Ladungsabbau mit Blitzschlag→ Ladungsausbreitung auf der Leitung→ Wanderwelle

Blitzüberspannungen

Entstehung von Blitzüberspannungen



Indirekter Blitzschlag mit beidseitig ablaufenden Wanderwellen

Blitzüberspannungen

Bewertung von Blitzüberspannungen

- Form und Höhe der Blitzüberspannungen unterliegen der statistischen Verteilung der Blitzformen und Blitzstromamplituden
- Abhängig von den Wellen- und Erdübergangswiderständen Leitung
- Wellen- und Erdübergangswiderständen sind weitgehend unabhängig von der Betriebsspannung eines Netzes und damit dessen Isolation
 - ➔ Bedeutung von Blitzüberspannungen nimmt zu höheren Spannungsebenen ab
- Für Netze mit Nennspannungen von $U \geq 300$ kV gewinnen daher Schaltüberspannungen zunehmende Bedeutung für die Isolationsbemessung

Blitzüberspannungen

Nachbildung von Blitzüberspannungen für Prüfzwecke

- Negative Wolke-Erde-Blitze bilden wegen ihrer hohen Steilheit und Häufigkeit ein wichtiges Kriterium für die Prüfung von Betriebsmitteln.
- In den Normen (IEC; EN; VDE u.a.) hat man sich für die Isolationsprüfungen auf einen genormten, unipolaren Spannungsstoß mit aperiodischem Spannungsverlauf im Rücken und einheitlichen Kennwerten geeinigt.
- Die Stirnzeit T_S (auch T_1) berücksichtigt die sehr kurzen Stirnzeiten negativer Folgeblitze und rückwärtiger Überschläge.
- Die Rückenhalbwertszeit T_r (auch T_2) bezeichnet das Abklingen des Spannungsstoßes auf 50% des Scheitelwertes

Blitzüberspannungen

Nachbildung von Blitzüberspannungen für Prüfzwecke

$$T_S = 1,2 \mu\text{s}$$

$$T_r = 50 \mu\text{s}$$

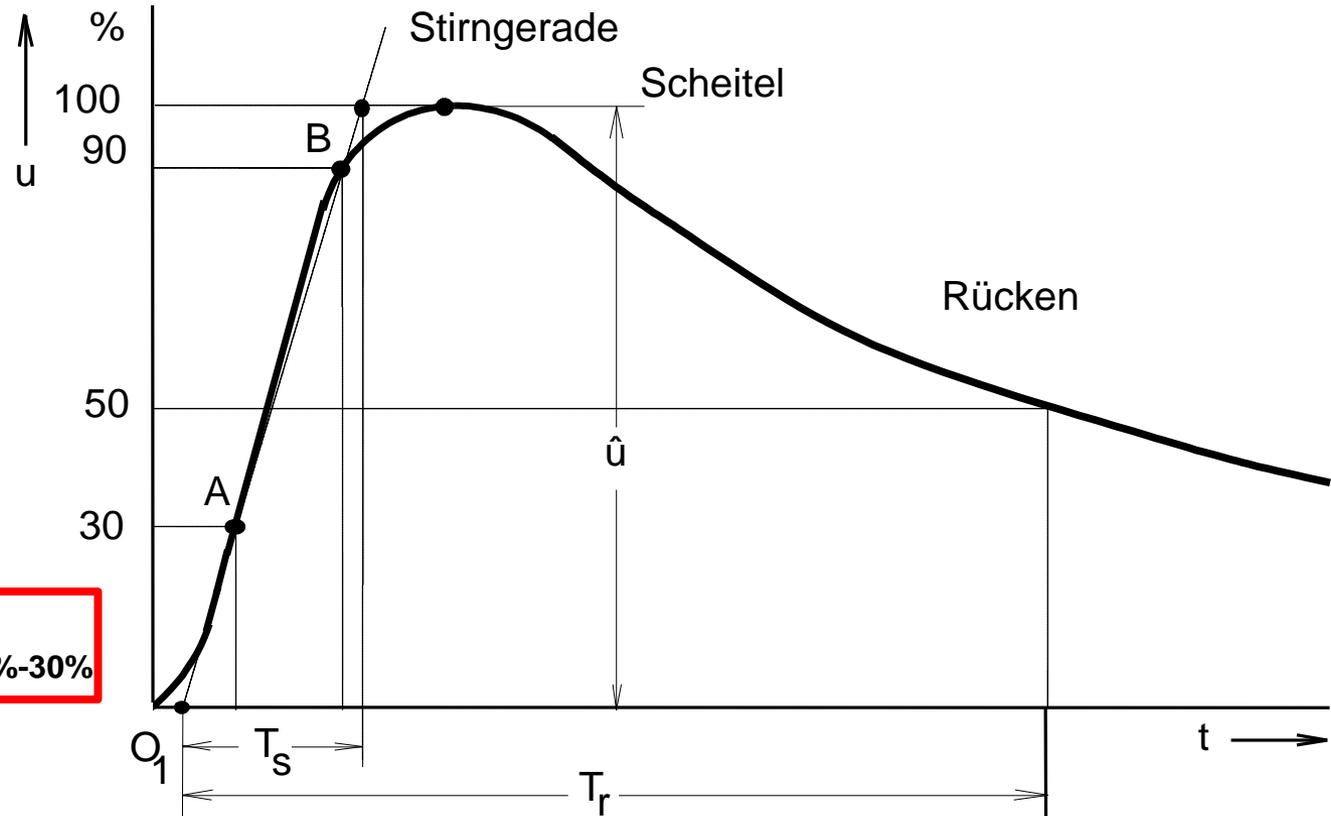
Toleranzen

$$\hat{u} \pm 3\%$$

$$T_S \pm 30\%$$

$$T_r \pm 20\%$$

$$T_S = 1,67 \cdot \Delta T_{90\%-30\%}$$



Genormte Blitzstoßspannung nach VDE 0432 Teil 1 (IEC 60-2)

(O_1 = Beginn der Stoßspannung; \hat{u} = Scheitelwert; T_S = Stirnzeit; T_r = Rückenhalbwertszeit)

Prüfspannungsformen

Zur Abdeckung der unterschiedlichen Beanspruchungen durch betriebsfrequente und transiente Überspannungsbeanspruchungen wurden für die verschiedenen Spannungsebenen folgende Spannungsprüfungen festgelegt:

Prüfung mit

- **Nennstehwechselfspannung (1min)**
- **Blitzstoßspannung (1,2 / 50)**
- **Schaltstoßspannung (250 / 2500)**

Prüfspannungsformen

Auswahl genormter Prüfspannungswerte für den Mittelspannungsbereich

Nennspannung U_n in kV	6	10	20	30
Max. dauernd zulässige Betriebsspannung U_m in kV	7,2	12	24	36
Nenn-Steh-Wechselspannung in kV	20	28	50	70
Nenn-Steh-Blitzstoßspannung in kV	60	75	125	170

Prüfspannungsformen

Auswahl genormter Prüfspannungswerte für den Hochspannungsbereich

Nennspannung U_n in kV (in Deutschland)	110	220	380 / 400	-
Max. dauernd zulässige Betriebsspannung U_m in kV	123	245	420	800
Nenn-Steh-Wechselspannung in kV	230	460	610	1150
Nenn-Steh-Blitzstoßspannung in kV	550	1050	1425	2100
Nenn-Steh-Schaltstoßspannung in kV (erst ab 300 kV zu prüfen)	-	-	1050	1425

E N D E