



Learn & Lunch Field Service  
Seligenstadt, 10. September 2020

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Dr. Thomas Weber  
Leiter Netzplanung  
E-Mail: [thomas.weber@se.com](mailto:thomas.weber@se.com)  
Tel.: +49 (0)151 12 107 103

Schneider Electric GmbH  
Field Service – Netzplanung  
Steinheimer Straße 117  
63500 Seligenstadt

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Übersicht in W-Moll

- **W**arum ist der Kurzschluss ein Thema ?
- **W**as ist ein Kurzschluss ?
- **W**elche Wirkungen hat ein Kurzschluss ?
- **W**arum benötige ich eine Norm für Kurzschlussstromberechnung ?
- **W**ie modelliere ich einen Kurzschluss ?
- **W**elche Randbedingungen muss ich berücksichtigen ?
- **W**arum berechne ich Kurzschlussströme ?
- **W**ie interpretiere ich die Ergebnisse der Berechnungen ?
- **W**elche Auswirkungen haben die Ergebnisse ?



# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Rechtfertigung der Kurzschlussstromberechnungen

- Wesentliche Problemstellungen und Ansätze
  - Verhältnisse bei Kurzschlusseintritt sind grundsätzlich nicht vorhersehbar  
=> Abschätzung des kritischsten Zustands
  - Anzahl der denkbaren Fehlerszenarien ist nicht begrenzt  
=> Beschränkung auf die „wesentlichen“ Kurzschlussfälle
- Anforderungen
  - Einfache Modelle der Betriebsmittel und Netzstrukturen  
=> soweit möglich und technisch sinnvoll
  - Berechnungsverfahren  
=> einheitliche Definition und Vergleichbarkeit der Ergebnisse

## Kurzschlussströme

sind Verursacher  
der stärksten  
Beanspruchungen  
der Betriebsmittel  
in Energieversorgungsnetzen.

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Rechtfertigung der Kurzschlussstromberechnungen

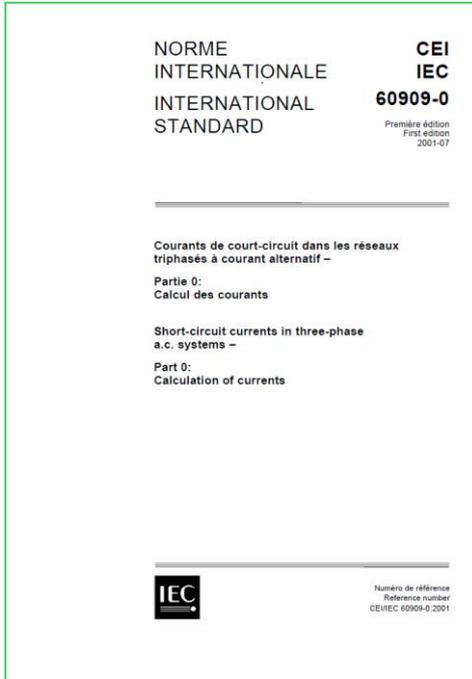
- Überblick über das Verfahren
  - Quasi-stationäre Berechnung
  - Unabhängig von der Lastsituation
  - Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle
  - Datenversorgung aus Bemessungsdaten der Betriebsmittel
  - Eignung des Verfahrens für Netze im Planungszustand
- Randbedingung Wirtschaftlichkeit
  - Investitionskosten bei Ausbaumaßnahmen
  - Betriebs- und Wartungskosten

## Ziel der Norm

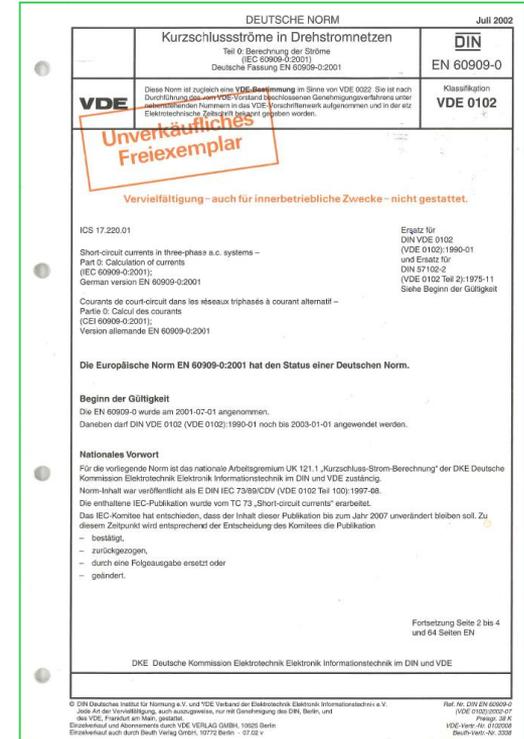
ist es,  
ein allgemeines,  
gut handhabbares  
und kurzes  
Verfahren festzulegen,  
das mit  
ausreichender  
Genauigkeit  
zu Ergebnissen  
auf der  
sicheren Seite  
führt.

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Normenwelt IEC 60909-0 – DIN EN 60909-0 – VDE 0102 – Stand: 2001/2002



- Erforderlich regelmäßig
  - Aktualisierung
  - Überarbeitung
- Alte Ausgaben (Historie)
  - VDE 0102 Teil 1: 1971-11
  - VDE 0102 Teil 2: 1975-11
  - VDE 0102: 1990-01
  - VDE 0102: 2002-07
- Letzte gültige Version seit
  - 1988 – IEC 60909-0
  - 1990 – VDE 0102



# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Normenwelt IEC 60909-0 – DIN EN 60909-0 – VDE 0102 – Stand: 2017



- Termine
  - Beginn - neu : 01.12.2016
  - Übergangsfrist - alt: 10.06.2019
  - Stability Date: 2021
- Wesentliche Änderungen
  - Beitrag von Windkraftwerken
  - Beitrag von Kraftwerken mit Vollumrichtern
  - Neue Dokumentenstruktur

DEUTSCHE NORM		Dezember 2016
	<b>DIN EN 60909-0 (VDE 0102)</b>	<b>DIN</b>
Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschriebenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der 'Liste Elektrotechnik + Automation' bekannt gegeben worden.		<b>VDE</b>
Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet.		
ICS 17.220.01	Ersatz für DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07 Siehe Anwendungsbeginn	
<b>Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2016); Deutsche Fassung EN 60909-0:2016</b>		
Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents (IEC 60909-0:2016); German version EN 60909-0:2016		
Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 0: Calcul des courants (IEC 60909-0:2016); Version allemande EN 60909-0:2016		
Gesamtumfang 75 Seiten		
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE		

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Kurzschlussarten nach VDE 0102

- Auswahl der wichtigsten Kurzschlussarten
  - Dreipoliger Kurzschluss
  - Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung
  - Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung
  - Einpoliger Kurzschluss
- Maximale und minimale Kurzschlussströme
  - zur Überprüfung der Bemessung von Betriebsmitteln
  - zur Definition von Schutzeinstellparametern
  - zur Auswahl von Sicherungsgrößen
  - zur Überprüfung des Hochlaufs von Motoren

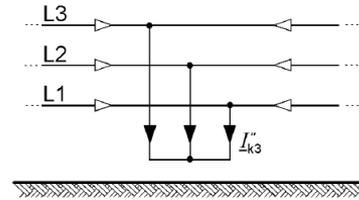
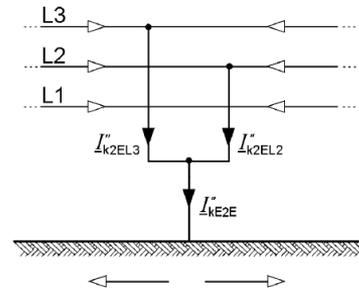


Bild 3a – Dreipoliger Kurzschluss



← Kurzschlussstrom

Bild 3c – Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

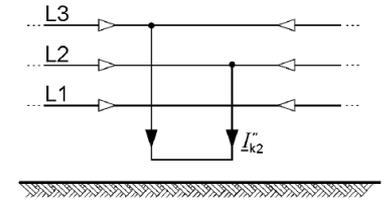
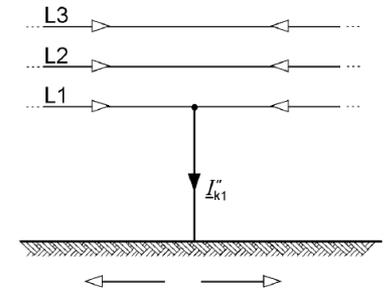


Bild 3b – Kurzschluss zwischen Außenleitern



← Teilkurzschlussstrom in Leitern und der Erdrückleitung

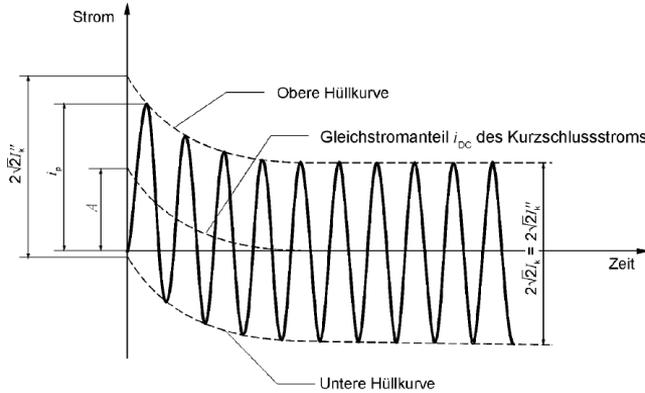
Bild 3d – Kurzschluss zwischen Außenleiter und Erde

Bild 3 – Beschreibung der Kurzschlüsse und ihrer Ströme

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Kurzschlussverlauf als zeitlicher Verlauf

- Generatorferner Kurzschluss

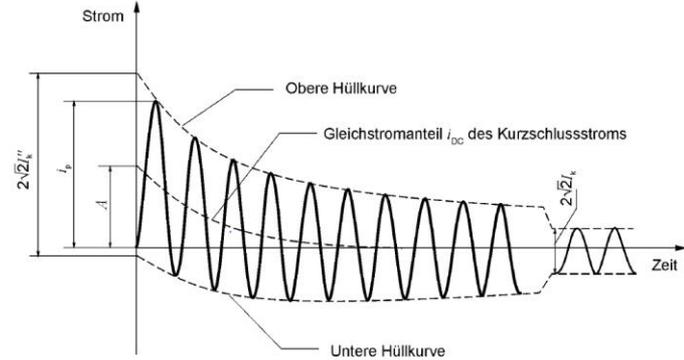


### Legende

- $I_k''$  Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
- $i_p$  Stoßkurzschlussstrom
- $I_k$  Dauerkurzschlussstrom
- $i_{DC}$  Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms
- $A$  Anfangswert des Gleichstromanteils  $i_{DC}$

**Bild 1 – Kurzschlussstrom für generatorfernen Kurzschluss mit konstantem Wechselstromanteil (schematischer Verlauf)**

- Generatornaher Kurzschluss



### Legende

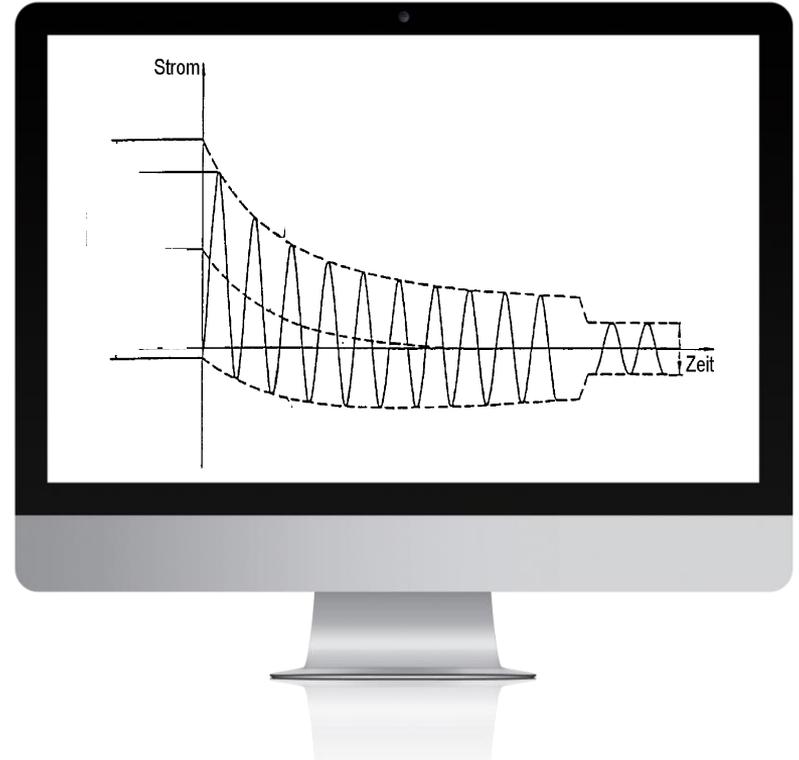
- $I_k''$  Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
- $i_p$  Stoßkurzschlussstrom
- $I_k$  Dauerkurzschlussstrom
- $i_{DC}$  Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms
- $A$  Anfangswert des Gleichstromanteils  $i_{DC}$

**Bild 2 – Kurzschlussstrom für generatornahen Kurzschluss mit abklingendem Wechselstromanteil (schematischer Verlauf)**

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatornaher Kurzschluss“

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung
- Ausschaltwechselstrom
- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom
- Stoßkurzschlussstrom
- Dauerkurzschlussstrom

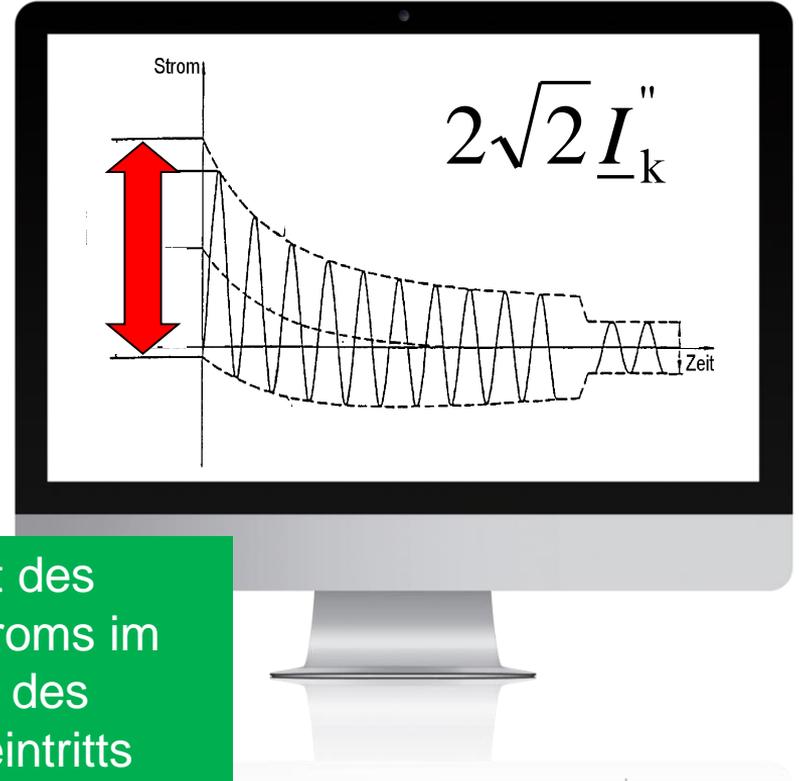


# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatormaher Kurzschluss“

$\underline{I}''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung
- Ausschaltwechselstrom
- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom
- Stoßkurzschlussstrom
- Dauerkurzschlussstrom



Effektivwert des  
Kurzschlussstroms im  
Augenblick des  
Kurzschlusseintritts

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatormaher Kurzschluss“

$I''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$S''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung

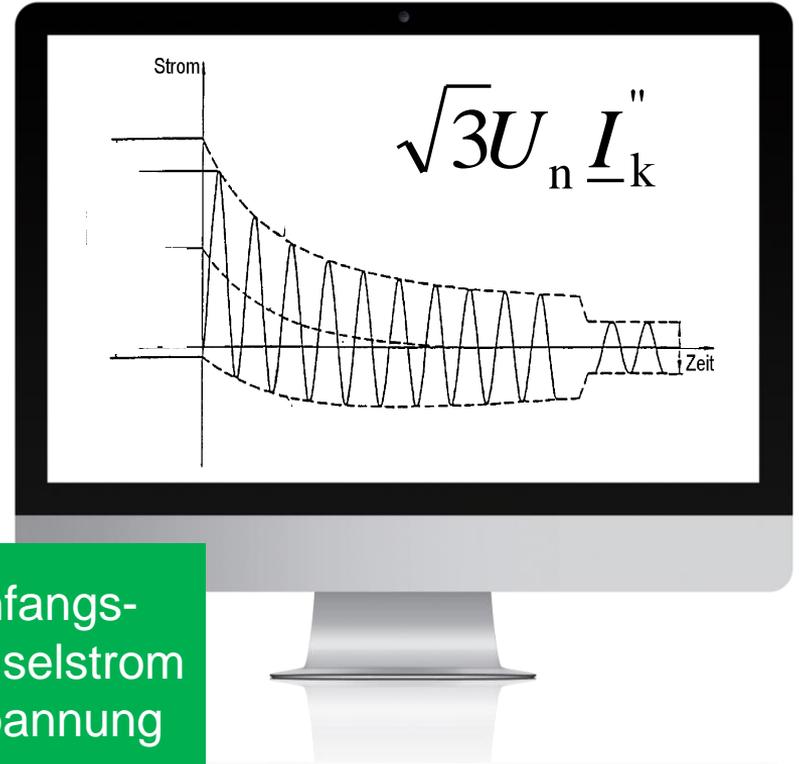
- Ausschaltwechselstrom

- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

- Stoßkurzschlussstrom

- Dauerkurzschlussstrom

Produkt aus Anfangs-Kurzschlusswechselstrom und Netznominalspannung



# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatornaher Kurzschluss“

$I''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$S''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung

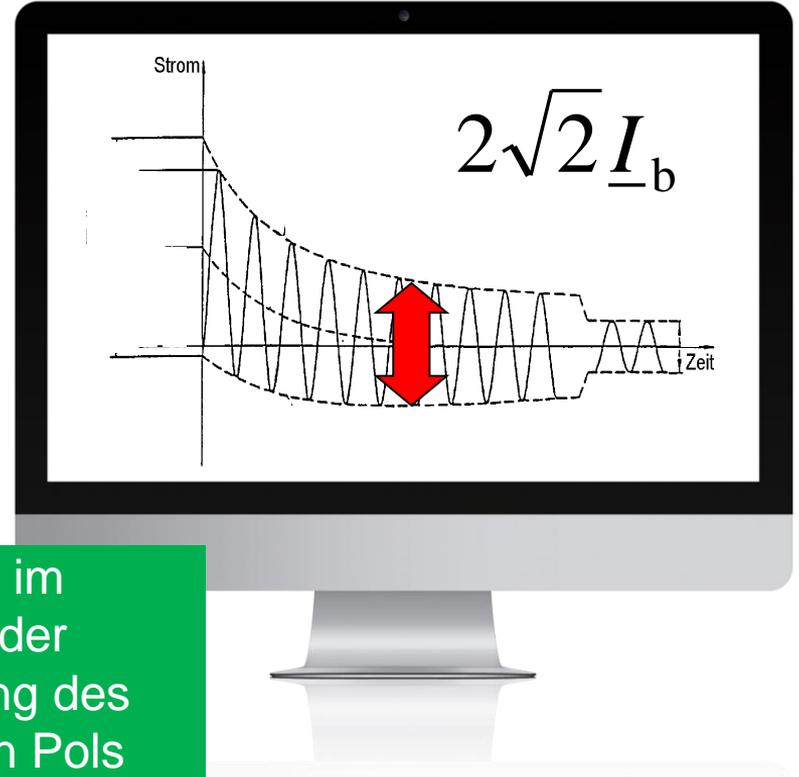
$I_b$

- Ausschaltwechselstrom

- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

- Stoßkurzschlussstrom

- Dauerkurzschlussstrom



Effektivwert im  
Augenblick der  
Kontakttrennung des  
erstlöschenden Pols

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatornaher Kurzschluss“

$I''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$S''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung

$I_b$

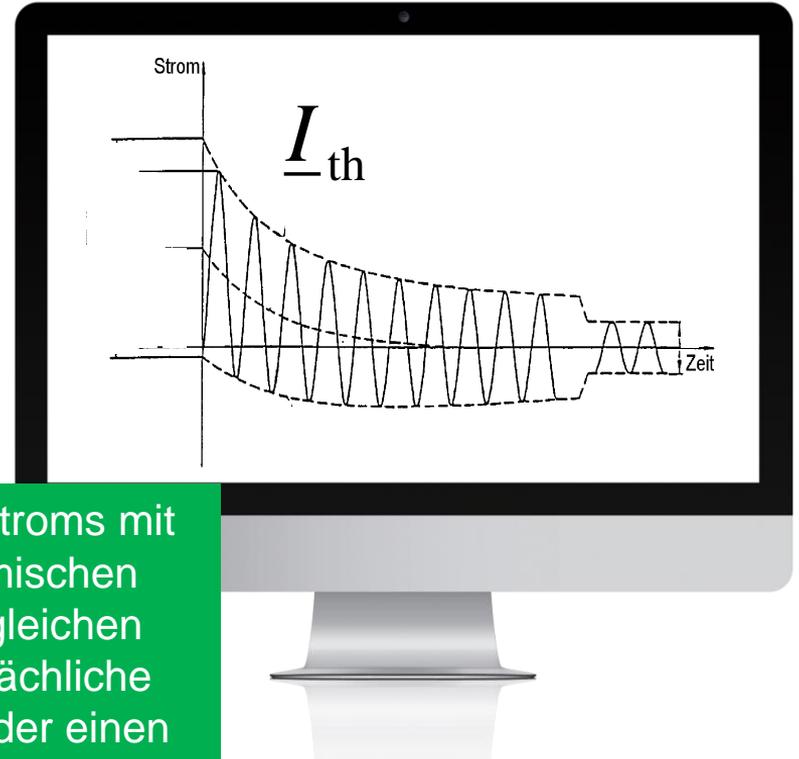
- Ausschaltwechselstrom

$I_{th}$

- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

- Stoßkurzschlussstrom

- Dauerkurzschlussstrom



Effektivwert eines Stroms mit der gleichen thermischen Wirkung und der gleichen Dauer wie der tatsächliche Kurzschlussstrom, der einen Gleichstromanteil enthalten und mit der Zeit abklingen kann

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatormaher Kurzschluss“

$I''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$S''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung

$I_b$

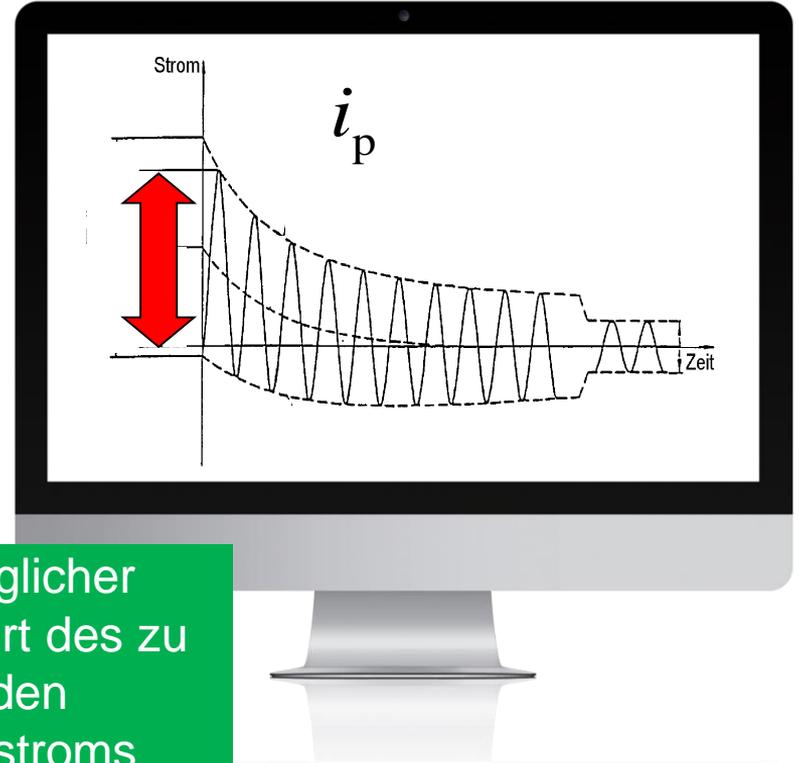
- Ausschaltwechselstrom

$I_{th}$

- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

$i_p$

- Stoßkurzschlussstrom
- Dauerkurzschlussstrom



Maximal möglicher  
Augenblickswert des zu  
erwartenden  
Kurzschlussstroms

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Wesentliche Kurzschlussgrößen am Beispiel „Generatormaher Kurzschluss“

$I''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$S''_k$

- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung

$I_b$

- Ausschaltwechselstrom

$I_{th}$

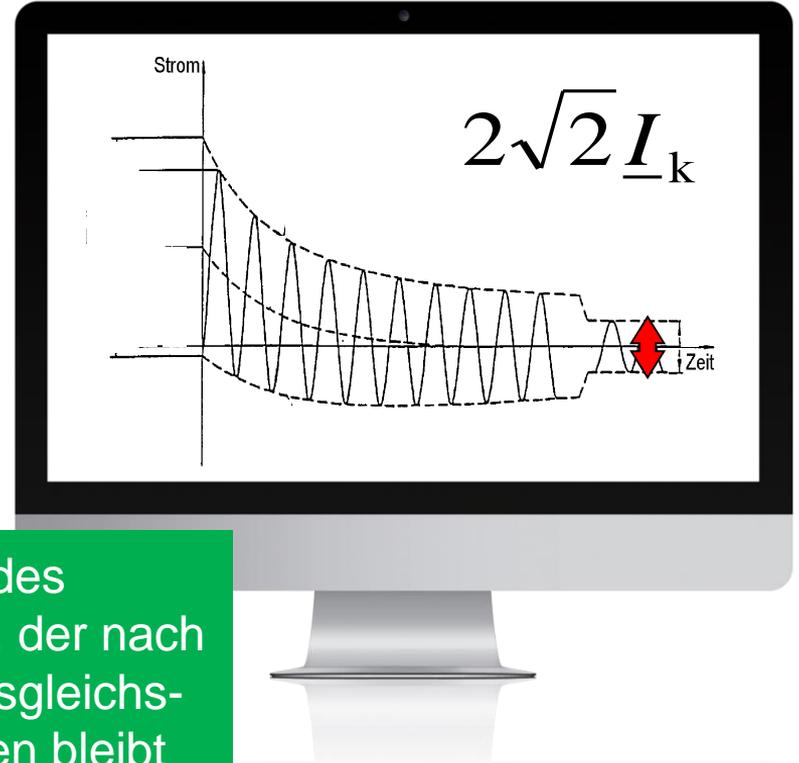
- Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom

$i_p$

- Stoßkurzschlussstrom

$I_k$

- Dauerkurzschlussstrom

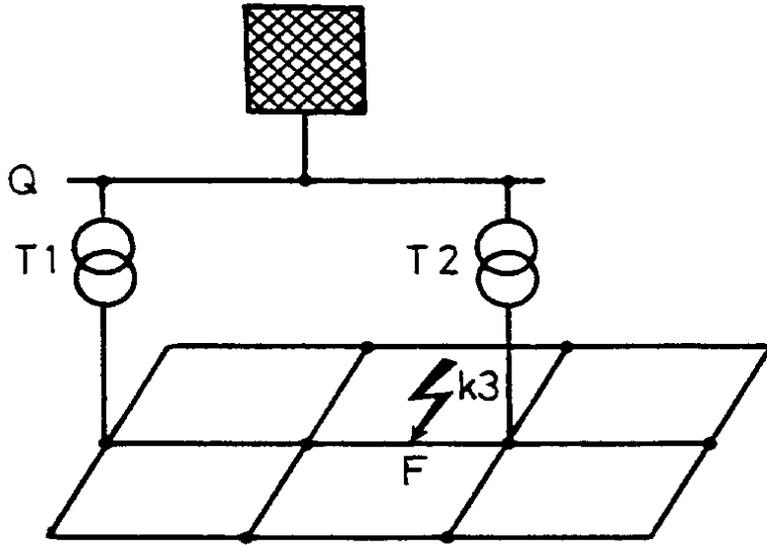


Effektivwert des Kurzschlussstroms, der nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge bestehen bleibt

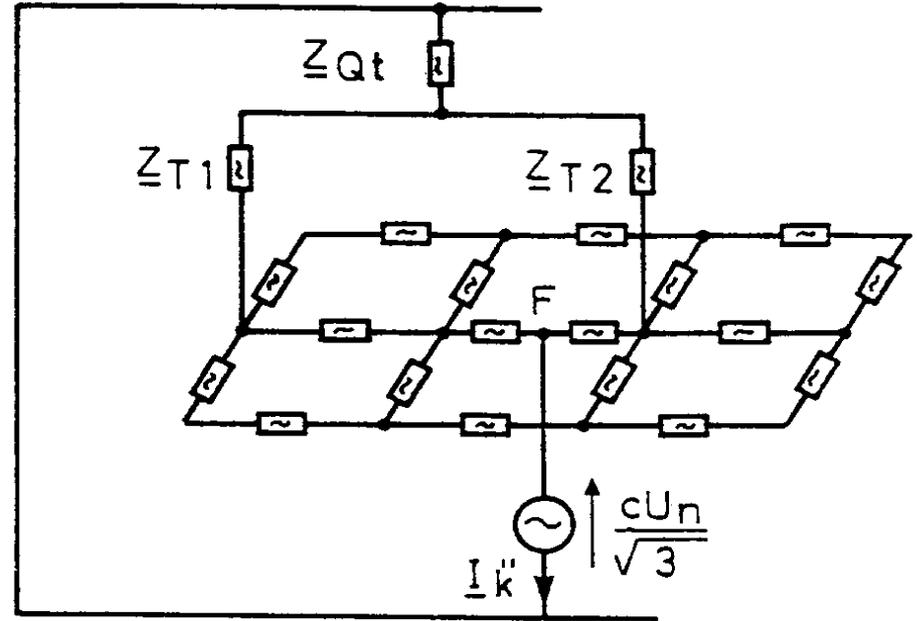
# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Der Weg zur Nachbildung - alte Version

- Netzschaltplan



- Ersatzschaltplan im Mitsystem (Equivalent Circuit Diagram in the Mitsystem)



# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

Der Weg zur Nachbildung – aktuelle Version

- Netzschaltplan

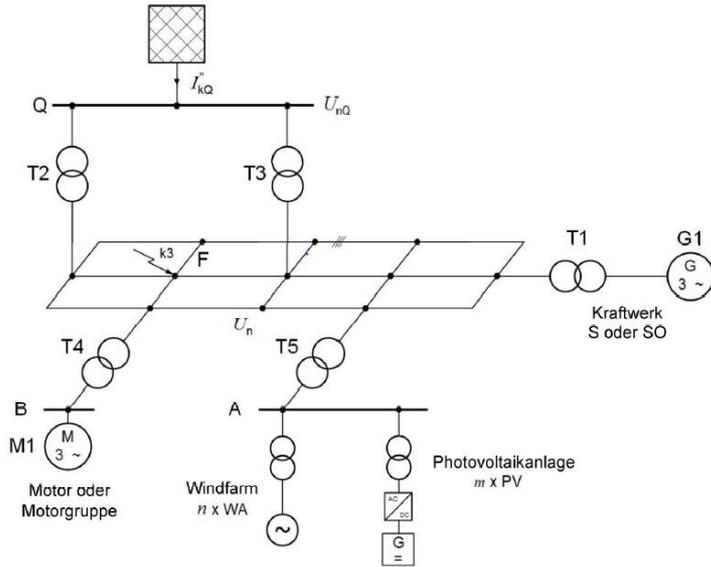


Bild 10a – Netzschaltplan

- Ersatzschaltplan im Mitsystem

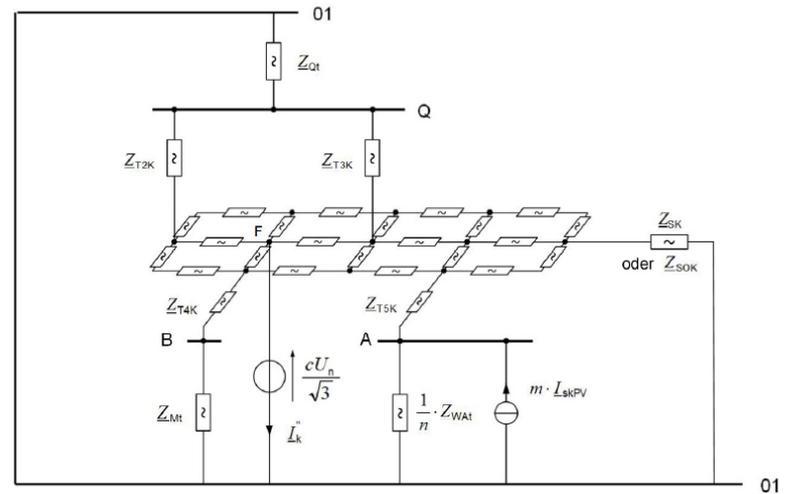
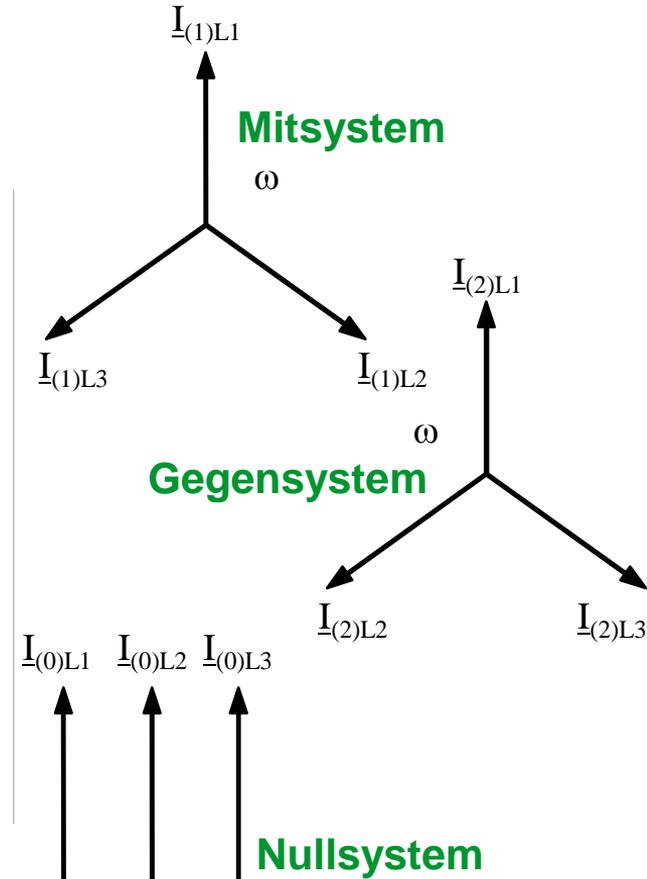


Bild 10b – Ersatzschaltplan zur Berechnung des Kurzschlussstromes (Windpark- oder solarparkinterne Kabel werden vernachlässigt)

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Hintergrund der Modellbildung nach VDE 0102 – Symmetrische Komponenten

- Anreiz: Einpolige Nachbildung des Drehstromnetzes im Mitsystems
  - Voraussetzung 1: symmetrischer Aufbau des Netzes
  - Voraussetzung 2: symmetrischer Betrieb des Netzes
- Anreiz: Darstellung unsymmetrischer Zustände durch „Baukasten“
  - Symmetrischer Zustand: Mitsystem
  - Unsymmetrischer Zustand ohne Erdberührung: Mit- und Gegensystem
  - Unsymmetrischer Zustand mit Erdberührung: Mit-, Gegen- und Nullsystem
- Anreiz: Einfache Anwendbarkeit
  - Einfache Bereitstellung der erforderlichen Daten der Betriebsmittel
  - Berechnungen per Hand häufig möglich (in einfachen Fällen)



# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Methode der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle

- Schritt 1: Vom Übersichtsbild zum Modell
  - Nachbildung der Betriebsmittel
  - Nachbildung als R/X-Elemente (Innenimpedanz)
  - Nachbildung der Einspeisung als Quelle
  - Nachbildung der Topologie
- Schritt 2: Einführung der Ersatzspannungsquelle
  - Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle
  - Ideale Spannungsquelle im Mitsystem
  - Einzige wirksame Spannungsquelle im Netz
  - Einführung des Faktors c
  - Ansatz ohne Leistungsfluss mit Fehlertoleranz +/- 5 %

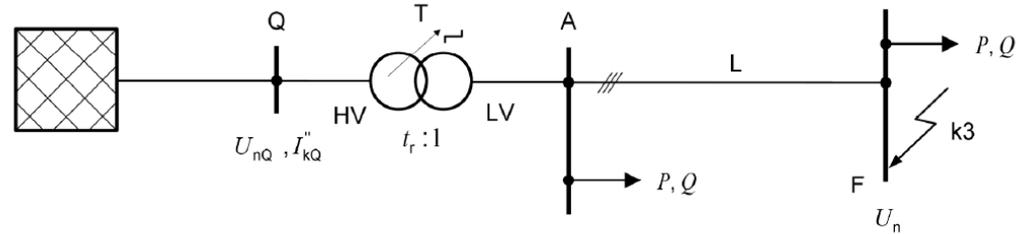


Bild 4a – Netzschaltplan

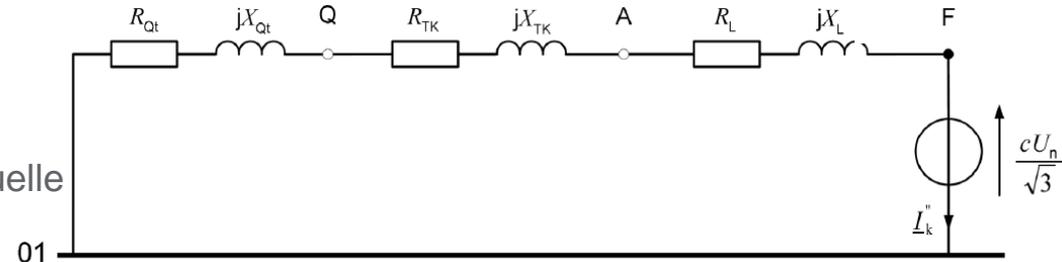


Bild 4b – Ersatzschaltplan des Mitsystems

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|}$$

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

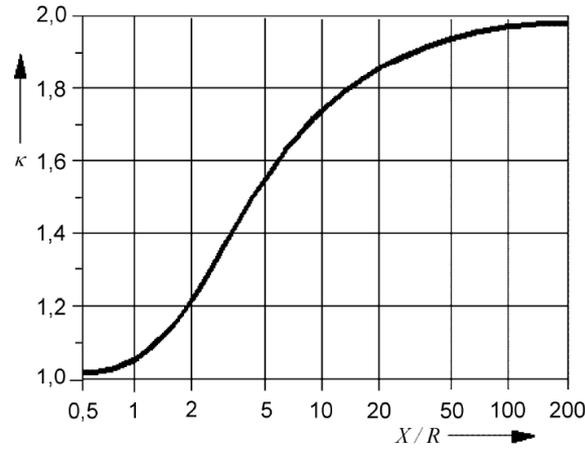
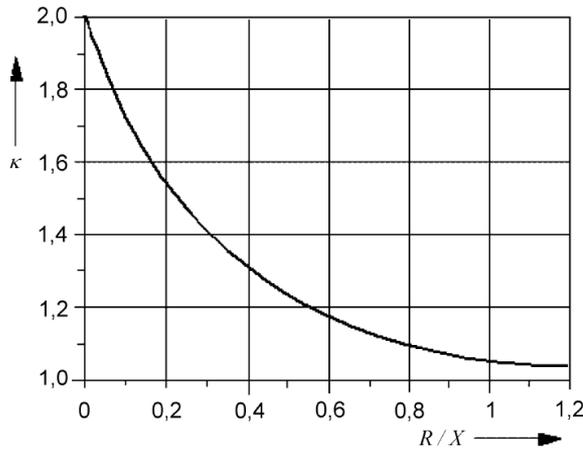
## Ermittlung des Stoßkurzschlussstroms

- Stoßkurzschlussstrom

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

- Stoßfaktor:

$$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X}$$



- Methode c: Ersatzfrequenzverfahren
  - Eine Ersatzimpedanz ( $Z_c$ ) des Netzes wird mit einer Frequenz  $f_c$  (Ersatzfrequenz) berechnet
  - $R / X = (R_c / X_c) (f_c / f)$
  - Verfahren der Ersatzfrequenz liefert die genauesten Ergebnisse
- Alternativen z.B. zur Handrechnung
  - Methode a: Einheitliches Verhältnis  $R/X$  oder  $X/R$
  - Methode b: Verhältnis  $R/X$  oder  $X/R$  an der Kurzschlussstelle

Bild 12 – Faktor  $\kappa$  bei Reihenschaltung als Funktion des Verhältnisses  $R/X$  oder  $X/R$

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Ermittlung des thermisch gleichwertigen Kurzschlussstroms

- Das Joule-Integral ist ein Maß für die erzeugte Energie in einer Resistanz des Netzes bei Kurzschluss

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n)}$$

- m: Faktor für den zeitabhängigen Wärmeeffekt des Gleichstromanteils des Kurzschlussstroms
- n: Faktor für den zeitabhängigen Wärmeeffekt des Wechselstromanteils des Kurzschlussstroms

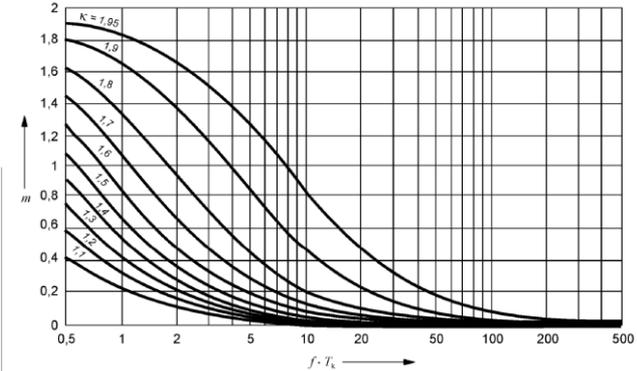


Bild 18 – Faktor  $m$  für den Wärmeeffekt des Gleichstromanteils des Kurzschlussstroms (die Gleichung für  $m$  ist zum Zwecke der Programmierung im Anhang A angegeben)

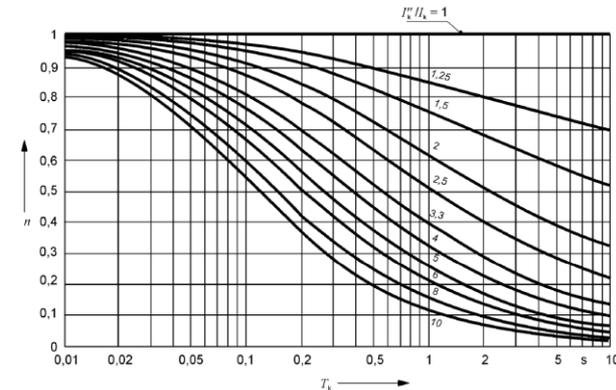


Bild 19 – Faktor  $n$  für den Wärmeeffekt des Wechselstromanteils des Kurzschlussstroms (die Gleichung für  $n$  ist zum Zwecke der Programmierung im Anhang A angegeben)

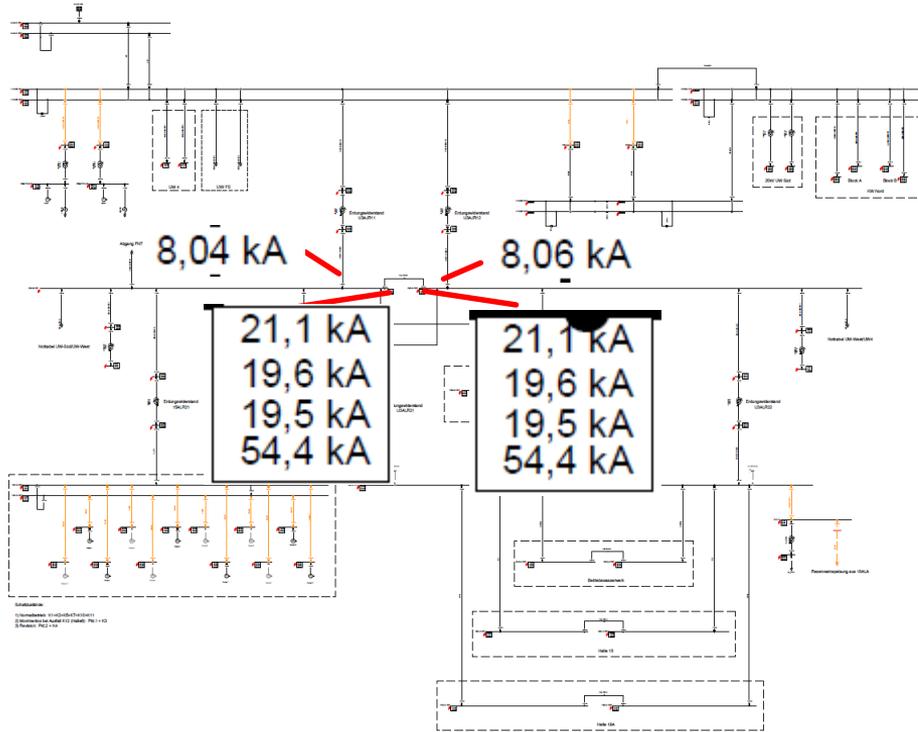
# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Beispiel – Längsgetrennte Schaltanlage

- Ausschnitt aus einem Industrienetz
- Zielsetzungen
  - Nachweis der Kurzschlussfestigkeit der Schaltanlage und Kabelsysteme
  - Ermittlung von Schutzeinstellungen (Kupplung, Einspeisefelder, Abgänge)
- Randbedingungen
  - Schaltzustand im Netz
    - Normalschaltzustand
    - Umschaltzustände
  - Rückspeisungen
    - Mittelspannungsmotoren
    - Niederspannungsmotoren
- Auswertung der Ergebnisse
  - Kurzschlussfestigkeit
    - Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom
    - Stoßkurzschlussstrom
  - Netzschutzeinstellungen (z.T.)
    - Anfangskurzschlusswechselstrom
    - Teilkurzschlussströme
  - Weitere Berechnungen erforderlich
    - Minimale zweipolige Kurzschlussströme
    - Einpolige Kurzschlussströme

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

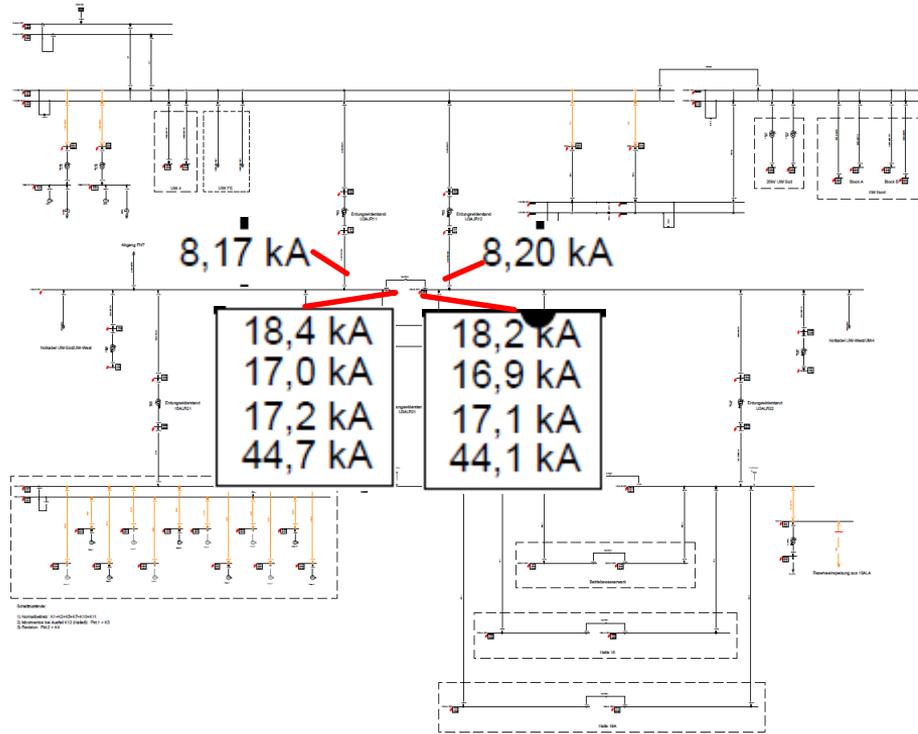
Beispiel – Längsgetrennte Schaltanlage – Betrieb gekuppelt über zwei Transformatoren



- Betriebszustand 1:  
Betrieb mit geschlossener Kupplung
- Was kann man erkennen:
  - Zufließende Ströme
  - Kurzschlussströme für die Anlage
  - Einfluss der Vermaschung
  - Einfluss der Rückspeisung
- Interpretation

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

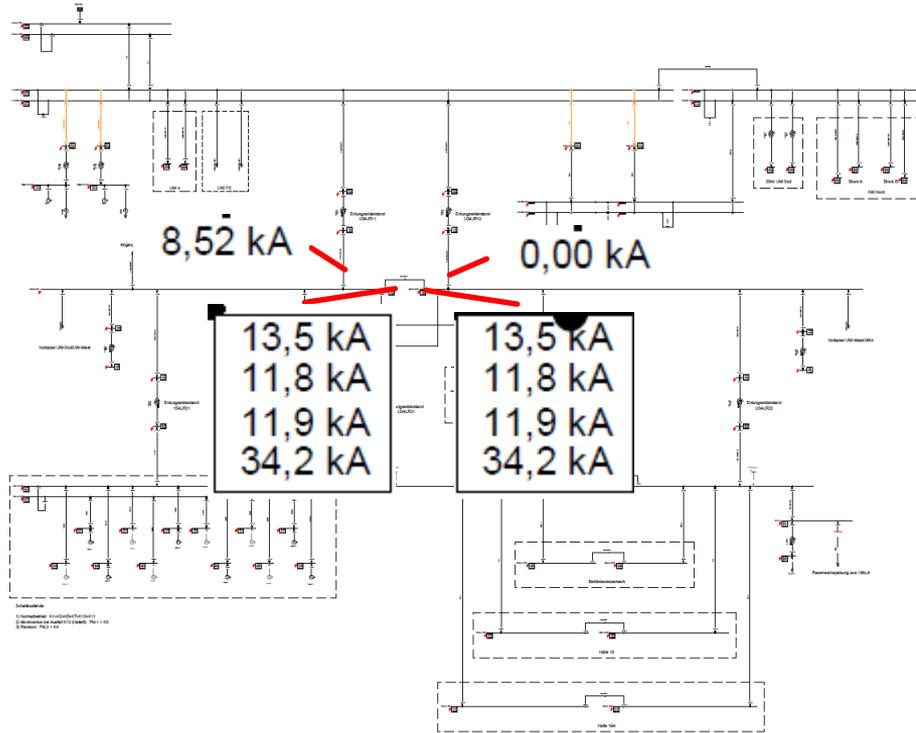
## Beispiel – Längsgetrennte Schaltanlage – Betrieb mit offener Kupplung



- Betriebszustand 2:  
Betrieb mit offener Kupplung
- Was kann man erkennen:
  - Zufließende Ströme
  - Kurzschlussströme für die Anlage
  - Einfluss der Vermaschung
  - Einfluss der Rückspeisung
- Interpretation

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Beispiel – Längsgetrennte Schaltanlage – Betrieb über einen Transformator



- Betriebszustand 3:  
Betrieb mit einem Transformator
- Was kann man erkennen:
  - Zufließende Ströme
  - Kurzschlussströme für die Anlage
  - Einfluss der Vermaschung
  - Einfluss der Rückspeisung
- Interpretation

# Kurzschlussstromberechnungen nach VDE 0102

## Ausblick

- VDE 0102 – Wesentliches Werkzeug für die Auslegung von Betriebsmitteln
- VDE 0102 – Wesentliches Werkzeug zur Prüfung des Kurzschlussniveaus in Netzen
- VDE 0102 – Wesentliches Werkzeug zur Ermittlung von Schutzeinstellparametern
- VDE 0102 – Komplexere Struktur durch EEG-Erweiterung in 2017
- VDE 0102 – (Scheinbar !) einfache Anwendung
- VDE 0102 – Erfahrung bei der Anwendung erforderlich

**Zentrales Werkzeug  
für Planung, Berechnung und Betrieb**



Life Is On

**Schneider**  
Electric