3 Kurzschlussberechnung im Drehstromsystem

Sowohl für einen Netzbetreiber der elektrischen Energieversorgung als auch für den Verbraucher ist es wichtig, dass ein Netz störungsfrei funktioniert. Kommt es durch äußere Einflüsse jedoch zu einem Störungsfall, so muss sichergestellt werden, dass alle verwendeten Betriebsmittel den auftretenden Belastungen standhalten. Diese Betriebsmittel sind (siehe Kapitel 2):

- Generatoren und Motoren
- Transformatoren
- Spulen und Kondensatoren
- Leitungen
- oder Kombinationen daraus

Beispielsweise kann ein Bagger ein in der Erde verlegtes Kabel beschädigen. Die Folge kann dann z.B. ein sog. Erdkurzschluss sein. Auch Orkane wie Kyrill im Jahre 2007 oder Ela im Jahre 2014 verursachten Schäden an Hochspannungsleitungen. Dadurch bedingt fließen hohe Ströme mit großen mechanischen sowie thermischen Beanspruchungen der Betriebsmittel eines Netzes. Um diese möglichst gering zu halten, werden unter anderem Leistungsschalter eingesetzt, die im Fehlerfall in der Lage sind, diese hohen Ströme abzuschalten.

Die Hersteller von Betriebsmitteln geben stets eine maximale Belastbarkeit an. Dabei wird auch angegeben, welchen maximalen Strom ein Leistungsschalter abschalten kann. Die Aufgabe des Netzbetreibers ist es nun sicherzustellen, dass beispielsweise keine Ströme auftreten können, die höher sind als der maximal abschaltbare Strom.
Dafür können mithilfe der **symmetrischen Komponenten** die verschiedenen Fehlermöglichkeiten berechnet und der maximal mögliche Strom bestimmt werden. Anhand der Ergebnisse kann der Netzbetreiber entscheiden, ob alle Betriebsmittel geeignet sind oder ob er Maßnahmen ergreifen muss, um die auftretenden Kurzschlüsse beispielsweise durch Kurzschlussdrosseln zu reduzieren.
Dieses Kapitel soll die prinzipielle Funktionsweise der Kurzschlussrechnung vermitteln. Das Ergebnis der Kurzschlussberechnung liefert nur die im Kurzschlussfall auftretenden Ströme, aber nicht die Spannungen im elektrischen Netz. Da die Berechnungen mit der komplexen Rechnung durchgeführt werden, erhält man als Ergebnis nur eine Lösung für den stationären Zeitbereich. Der Übergangsbereich zwischen Auftreten des Kurzschlusses und Eintreten des stationären Zustands kann mithilfe von Einschwingvorgängen berechnet werden, die in **Kapitel 6** behandelt werden. Die möglichen Kurzschluss-Szenarien sind im folgenden Bild dargestellt. Einige werden in den nächsten Abschnitten exemplarisch beschrieben. Für vertiefende Betrachtungen und Analysen wird auf die Lehrveranstaltung „**Elektrische Energieversorgung**“ verwiesen.

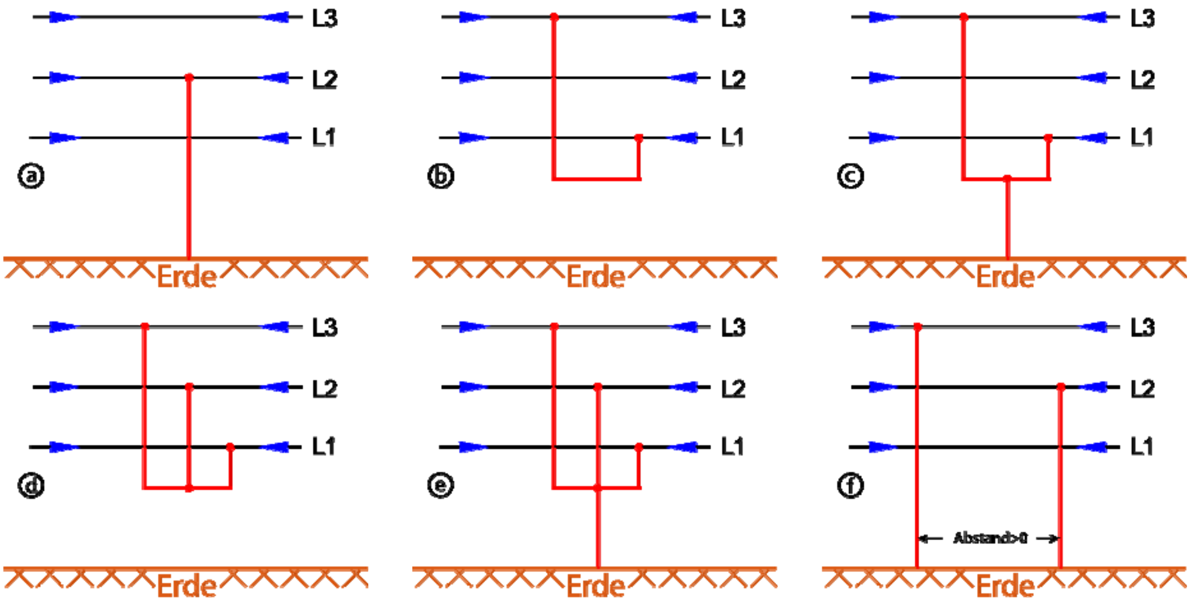

Bild 3-1: *Einige mögliche Kurzschluss-Szenarien in einem Drehstromsystem:*
a: Erdschluss, b: zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung,
c: zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung,
d: dreipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung,
e: dreipoliger Kurzschluss mit Erdberührung,
f: zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

Einige dieser Kurzschlussvarianten werden in den folgenden Abschnitten mittels der symmetrischen Komponenten behandelt.

Für die Berechnung der Kurzschluss-Ströme gilt ferner:

I_K'' ist gemäß **VDE 0102 Teil 0** der sog. Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (Initial symmetrical short circuit current). Es handelt sich dabei um „den Effektivwert des Wechselstromanteils eines zu erwartenden Kurzschlussstroms im Augenblick des Kurzschlusseintritts, wenn die Impedanz ihre Größe zum Zeitpunkt Null beibehält.

3.1 Symmetrischer dreiphasiger Kurzschluss

Bei einem 3-phasigen Kurzschluss werden die Phasen gleichmäßig belastet. Daher handelt es sich um einen symmetrischen Belastungsfall und es muss lediglich das Mitsystem berücksichtigt werden, so dass die Lösung auch ohne Hilfe der symmetrischen Komponenten möglich ist.

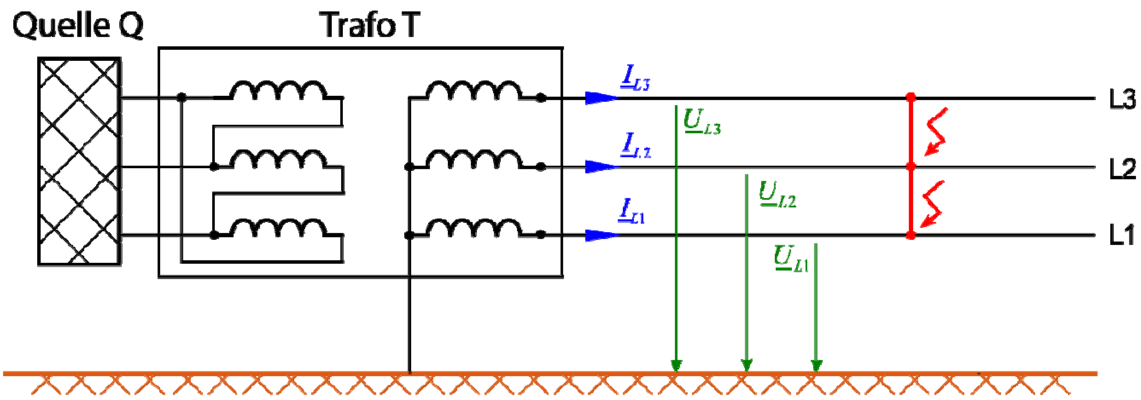

Bild 3-2: *Symmetrischer drei-phasiger Kurzschluss ohne Erdberührung*

Bei Vernachlässigung der Betriebsströme und des Fehlerübergangswiderstandes an den Fehlerstellen ergeben sich für die Leiterströme und die Phasenspannungen (Sternspannungen) folgende Fehlerbedingungen:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = U_n$$
$$\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 0 \qquad (3\text{-}1)$$

Ist $\underline{Z}_k$ die **symmetrische** Kurzschluss-Impedanz des Netzes mit

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{kL1} = \underline{Z}_{kL2} = \underline{Z}_{kL3} = R_k + jX_k \qquad (3\text{-}2)$$

dann ergibt sich ein Strom bei symmetrischer Kurzschlussimpedanz des Netzes und Korrekturfaktor „c" gemäß VDE 0102[1]

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \qquad (3\text{-}3)$$

[1] Im Rahmen dieser Grundlagenveranstaltung wird auf den Korrekturfaktor nicht eingegangen, siehe „Elektrische Energieversorgung" in der Vertiefungsrichtung „Elektrische Energietechnik"

3.2 Unsymmetrische Kurzschlüsse

Die Berechnung von unsymmetrisch belasteten 3-Phasensystemen ist mit hohem Aufwand verbunden. Hier bietet sich die Lösung mit Hilfe der symmetrischen Komponenten nach Kapitel 1 an. Das unsymmetrische System wird damit symmetriert, um die Berechnung zu vereinfachen.

Das nachfolgende Bild zeigt die Komponentenersatzschaltbilder (Mit-, Gegen- und Nullsystem) des symmetrisch aufgebauten Drehstromsystems bei symmetrischer Einspeisung in den drei Phasen. Dabei bezeichnet die Spannung U_{q1} die Sternspannung des speisenden Netzes.

Aufgrund der symmetrischen Einspeisespannungen treten in den Ersatzschaltbildern für das Gegen- und das Nullsystem keine speisenden Spannungen auf. Es handelt sich um passive Systeme.

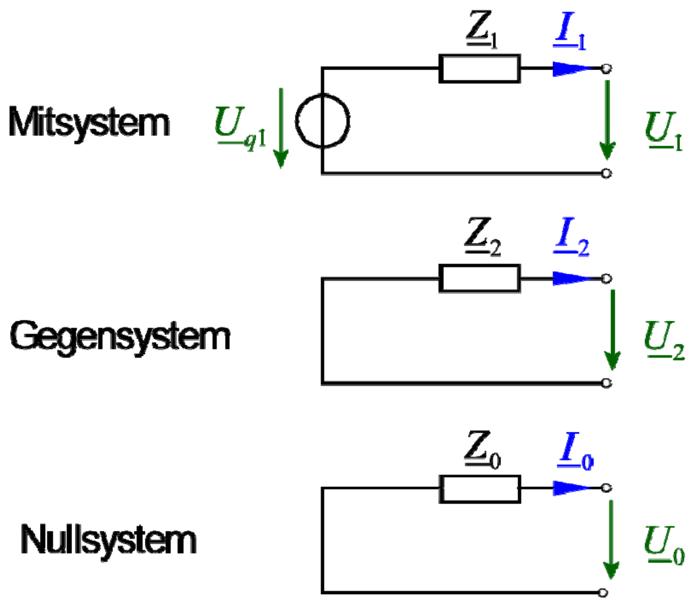

Bild 3-3: *Komponentenersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Null-Systems gemäß Kapitel 2*

Die Vorgehensweise ist nun wie folgt:

Die Komponentenströme werden aus den Leiterströmen gebildet. Dieses geschieht unter Berücksichtigung der Randbedingungen des jeweiligen Kurzschlussfalls.

Das symmetrisch gespeiste und symmetrische Drehstromsystem wird dabei durch das entkoppelte einphasige System dargestellt.

Diese drei Ersatzschaltungen Bild 3-3: bilden die Basis für die Kurzschlussberechnungen. Für jeden Fehlerfall werden die Ersatzschaltungen mit einer anderen Topologie zusammengeschaltet. Es werden nicht immer alle Elemente verwendet.

Wie die Zusammenschaltung erfolgt, wird im Folgenden für einige Fälle erläutert.

3.2.1 Berechnung einpoliger Kurzschlussströme bei niederohmiger Sternpunkterdung

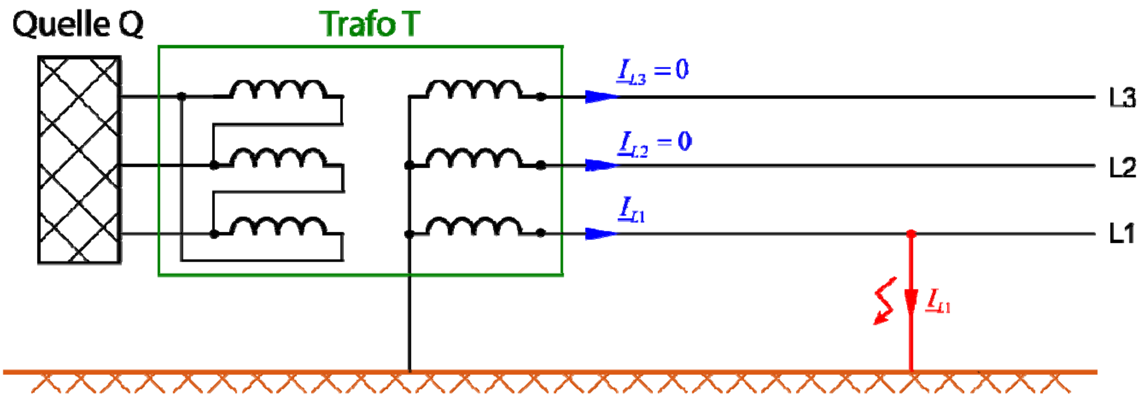

Bild 3-4: *Einpoliger Kurzschluss bei niederohmiger Sternpunkterdung*

Bei Vernachlässigung der Betriebsströme und des Fehler-Übergangswiderstandes an der Fehlerstelle ergibt für einen einpoligen Erdkurzschluss der Phase L1:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1} &= 0 \\ \underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} &= 0 \end{aligned} \tag{3-4}$$

Die Symmetriegleichungen für die Komponentenströme vereinfachen sich daher zu

$$\begin{aligned} &\text{Mitkomponente:} && \underline{I}_1 = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1}+0+0\right) = \frac{\underline{I}_{L1}}{3} \\ &\text{Gegenkomponente:} && \underline{I}_2 = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1}+0+0\right) = \frac{\underline{I}_{L1}}{3} \\ &\text{Nullkomponente:} && \underline{I}_0 = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1}+0+0\right) = \frac{\underline{I}_{L1}}{3} \end{aligned} \tag{3-5}$$

Damit ist aber

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{1}{3}\underline{I}_{L1} \tag{3-6}$$

Für die Spannungen gilt dann wegen $\underline{U}_{L1}=0$:

$$\text{Mitkomponente:} \quad \underline{U}_1 = \frac{1}{3}\left(0 + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L3}\right)$$

$$\text{Gegenkomponente:} \quad \underline{U}_2 = \frac{1}{3}\left(0 + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{L2} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{L3}\right) \tag{3-7}$$

$$\text{Nullkomponente:} \quad \underline{U}_0 = \frac{1}{3}\left(0 + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}\right)$$

Die Gleichung der Ströme (3-6) und die nachfolgende Gleichung der Spannungen (3-7) werden dann erfüllt, wenn man die Klemmen des Mit-, Gegen- und Nullsystems gemäß Bild 3-5: miteinander verbindet.

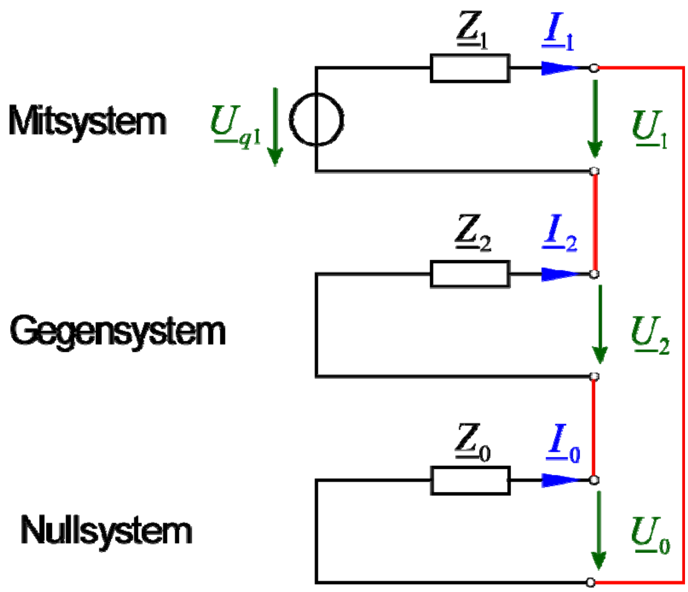

Bild 3-5: *Verschaltung des Mit., Gegen- und Null-Systems für den Kurzschluss in Bild 3-4*:

Wegen

$$1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0 \tag{3-8}$$

gilt

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \tag{3-9}$$

Die Spannungen des Mit-, Gegen- und Nullsystems ergeben daher sich zu

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_{q1} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \\ \underline{U}_2 &= -\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 \\ \underline{U}_0 &= -\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0 \end{aligned} \tag{3-10}$$

Einsetzen von Gleichung (3-10) Gleichung (3-9) ergibt dann:

$$\underline{U}_{q1} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 - \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 - \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0 = 0 \tag{3-11}$$

Die Mitkomponente des Stromes $\underline{I}_1$ ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung (3-6) und (3-11) sofort zu

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \tag{3-12}$$

Der maximale bzw. minimale einpolige Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ergibt sich mit dem Korrekturfaktor „c" gemäß VDE 0102 dann zu

$$\underline{I}_k'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \tag{3-13}$$

3.2.2 Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung

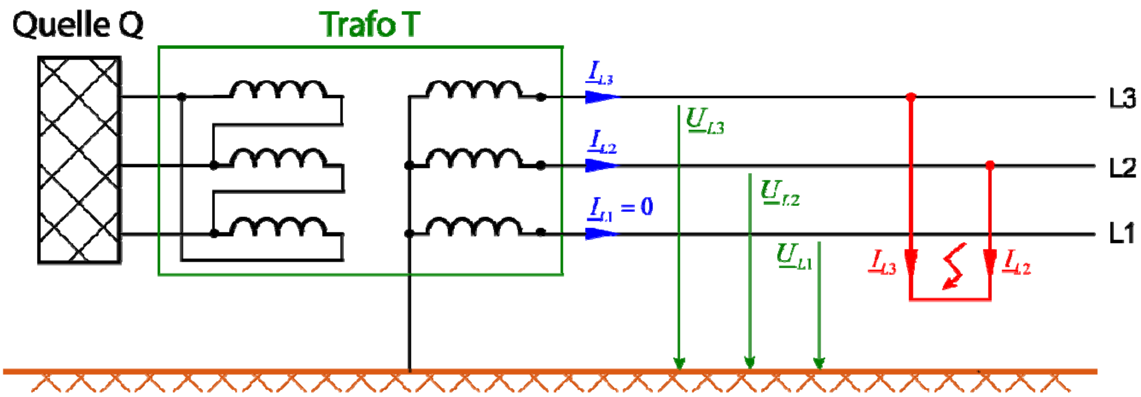

Bild 3-6: *Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung*

Bei Vernachlässigung der Betriebsströme und des Übergangswiderstandes an der Fehlerstelle ergeben sich für die Leiterströme und die Spannungen folgende Fehlerbedingungen

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad \underline{I}_{L2} = -\underline{I}_{L3} \quad \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} \tag{3-14}$$

Aus den vorhandenen Fehlerbedingungen und den Symmetriegleichungen aus Kapitel 2 ergeben sich für die Nullkomponente des Stromes

$$\begin{aligned}\underline{I}_0 &= \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(0 + \underline{I}_{L2} - \underline{I}_{L2}\right) = 0\end{aligned} \tag{3-15}$$

Für die Mitkomponente und die Gegenkomponente des Stromes ergibt sich analog dann

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1} + \underline{a}\cdot\underline{I}_{L2} + \underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L3}\right) & \underline{I}_2 &= \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L1} + \underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L2} + \underline{a}\cdot\underline{I}_{L3}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(0 + \underline{a}\cdot\underline{I}_{L2} - \underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L2}\right) & &= \frac{1}{3}\left(0 + \underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L2} - \underline{a}\cdot\underline{I}_{L2}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(\underline{a} - \underline{a}^2\right)\cdot\underline{I}_{L2} & &= \frac{1}{3}\left(\underline{a}^2 - \underline{a}\right)\cdot\underline{I}_{L2}\end{aligned} \tag{3-16}$$

Daraus folgt für diesen Fall

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2 \tag{3-17}$$

Wegen

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{L1} + \underline{a}\cdot\underline{U}_{L2} + \underline{a}^2\cdot\underline{U}_{L3}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{L1} + \left(\underbrace{\underline{a} + \underline{a}^2}_{=-1}\right)\cdot\underline{U}_{L2}\right)\end{aligned} \tag{3-18}$$

und

$$\begin{aligned}\underline{U}_2 &= \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{L1} + \underline{a}^2\cdot\underline{U}_{L2} + \underline{a}\cdot\underline{U}_{L3}\right) \\ &= \frac{1}{3}\left(\underline{U}_{L1} + \left(\underbrace{\underline{a}^2 + \underline{a}}_{=-1}\right)\cdot\underline{U}_{L2}\right)\end{aligned} \tag{3-19}$$

gilt hier

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \tag{3-20}$$

Bei Betrachtung von Bild 3-3: erhält man sofort

$$\underline{U}_1 = -\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = -\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_2$$
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{q1} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \tag{3-21}$$

Umstellen und Zusammenfassen liefert nun

$$\underline{U}_{q1} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_2$$
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \tag{3-22}$$

Setzt man obige Gleichungen in die Entsymmetriergleichungen (2-13) gemäß *Kapitel 2* ein, so ergibt sich der Strom in der nicht vom Fehler betroffenen Phase L1 zu

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_1 - \underline{I}_1 + 0 = 0 \tag{3-23}$$

Für die beiden am Kurzschluss beteiligten Leiter gilt:

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_1 + \underline{a} \cdot \underline{I}_2 + 0 = \left(\underline{a}^2 - \underline{a}\right) \cdot \underline{I}_1$$
$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_2 + 0 = \left(\underline{a} - \underline{a}^2\right) \cdot \underline{I}_1 \tag{3-24}$$

Bei Verwendung der Definition von $\underline{a}$ ergibt sich dann:

$$\underline{I}_{L2} = -j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_1$$
$$\underline{I}_{L3} = +j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_1 \tag{3-25}$$

Der Strom in der Phase L2 ist damit

$$\underline{I}_{L2} = -j\sqrt{3}\,\frac{\underline{U}_{q1}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \tag{3-26}$$

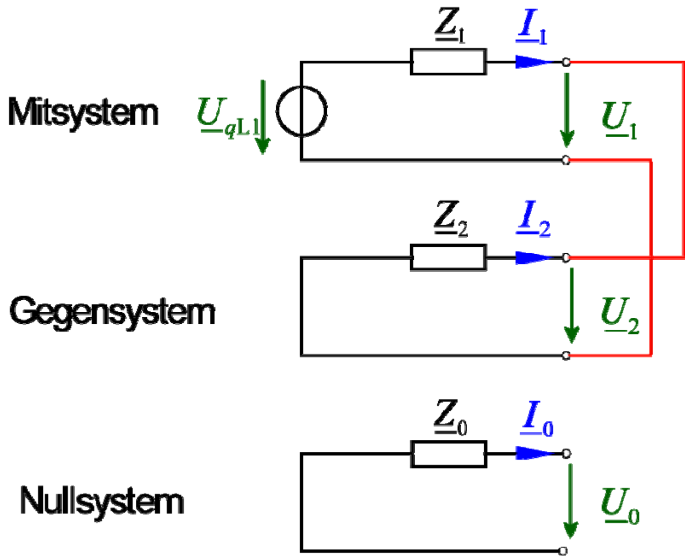

Bild 3-7: *Verschaltung des Mit., Gegen- und Null-Systems für den Kurzschluss in Bild 3-6:,*
es liegt eine Reihenschaltung von $\underline{Z}_1$ mit $\underline{Z}_2$ vor

3.2.3 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

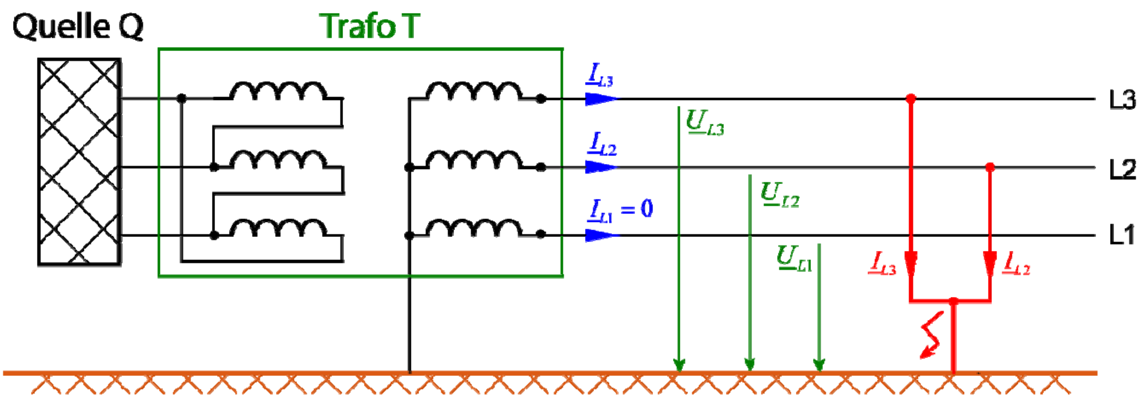

Bild 3-8: *Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung*

Werden wieder Betriebsströme und Übergangswiderstände an der Fehlerstelle vernachlässigt, ergeben sich für die Leiterströme und die Spannungen folgende Fehlerbedingungen

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{L3} = 0 \\ \underline{I}_{L1} &= 0 \end{aligned} \qquad (3\text{-}27)$$

Daher gilt für die Ströme und Spannungen des Mit-, Gegen- und Null-Systems:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3}\left(\underline{a}\cdot\underline{I}_{L2} + \underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L3}\right)$$
$$\underline{I}_2 = \frac{1}{3}\left(\underline{a}^2\cdot\underline{I}_{L2} + \underline{a}\cdot\underline{I}_{L3}\right) \tag{3-28}$$
$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}\left(\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3}\right)$$

Aus Bild 3-3: folgt sofort:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{qL1} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_1} \quad \underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} \quad \underline{I}_0 = -\frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} \tag{3-29}$$

und wegen

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_0 = \frac{1}{3}\underline{U}_{L1} \tag{3-30}$$

ist dann

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{qL1} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_1} \quad \underline{I}_2 = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_2} \quad \underline{I}_0 = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_0} \tag{3-31}$$

Es gilt aber auch nach Gleichung (3-28):

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \tag{3-32}$$

Da

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_0 \cdot \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_2} \tag{3-33}$$

gilt, erhält man nun

$$\underline{I}_0 = -\underline{I}_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_2}} = -\underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2} \tag{3-34}$$

und

$$\underline{I}_2 = -\underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2} \tag{3-35}$$

Damit werden die Ströme des Gegen- und des Null-Systems allein durch den Strom des Mit-Systems $\underline{I}_1$ beschrieben. Dieser muss nun noch berechnet werden.
Wegen

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 = \underline{U}_{qL1} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \tag{3-36}$$

und

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0 \tag{3-37}$$

folgt:

$$\underbrace{-\underbrace{\left(-\underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2}\right)}_{\underline{I}_0} \cdot \underline{Z}_0}_{\underline{U}_0} = \underline{U}_{qL1} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \tag{3-38}$$

$$\underline{U}_{qL1} = \underline{I}_1 \cdot \left(\frac{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2} + \underline{Z}_1 \right)$$

Umstellen und Einsetzen liefert dann für die gesuchten drei Ströme:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_1 &= \frac{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_2} \cdot \underline{U}_{qL1} \\
\underline{I}_2 &= -\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_2} \cdot \underline{U}_{qL1} \\
\underline{I}_0 &= -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1 + \underline{Z}_0\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_2} \cdot \underline{U}_{qL1}
\end{aligned} \tag{3-39}$$

Der Strom $\underline{I}_1$ wird durch die Reihenschaltung $\underline{Z}_1$ mit der Parallelschaltung $\underline{Z}_2$ aus und $\underline{Z}_0$ bestimmt.
Die Rücktransformation zur Berechnung der Leiterströme liefert erwartungsgemäß

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \tag{3-40}$$

Für die beiden Leiterströme des Kurzschlussfalls ergibt sich nun

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L2} &= \underline{a}^2\cdot\underline{I}_1+\underline{a}\cdot\underline{I}_2+\underline{I}_0\\ &= \frac{\left(\underline{Z}_0+\underline{Z}_2\right)\cdot\underline{a}^2-\underline{Z}_0\cdot\underline{a}-\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1+\underline{Z}_0\underline{Z}_2+\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\cdot\underline{U}_{qL1}\\ &= \frac{\underline{Z}_0\left(\underline{a}^2-\underline{a}\right)+\underline{Z}_2\left(\underline{a}^2-1\right)}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1+\underline{Z}_0\underline{Z}_2+\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\cdot\underline{U}_{qL1}\end{aligned} \tag{3-41}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L3} &= \underline{a}\cdot\underline{I}_1+\underline{a}^2\cdot\underline{I}_2+\underline{I}_0\\ &= \frac{\left(\underline{Z}_0+\underline{Z}_2\right)\cdot\underline{a}-\underline{Z}_0\cdot\underline{a}^2-\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1+\underline{Z}_0\underline{Z}_2+\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\cdot\underline{U}_{qL1}\\ &= \frac{\underline{Z}_0\left(\underline{a}-\underline{a}^2\right)+\underline{Z}_2\left(\underline{a}-1\right)}{\underline{Z}_0\underline{Z}_1+\underline{Z}_0\underline{Z}_2+\underline{Z}_1\underline{Z}_2}\cdot\underline{U}_{qL1}\end{aligned} \tag{3-42}$$

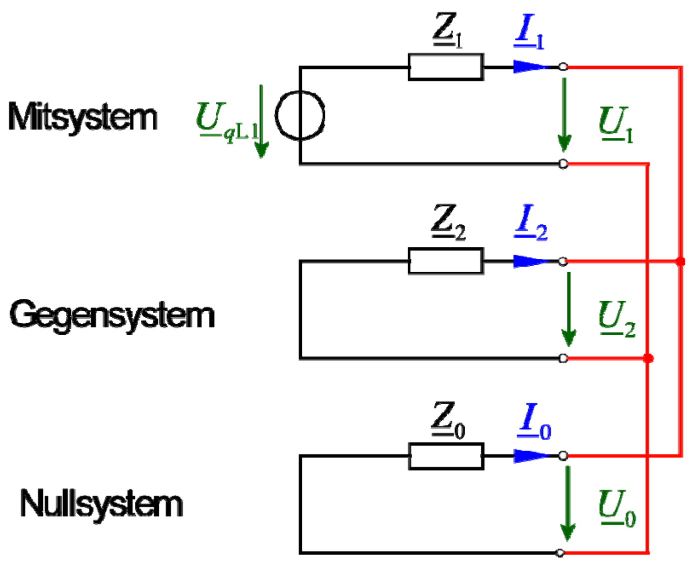

Bild 3-9: *Verschaltung des Mit., Gegen- und Null-Systems für den Kurzschluss-Fall in Bild 3-8:, Parallelschaltung $\underline{Z}_2$ und $\underline{Z}_0$ in Reihe zu $\underline{Z}_1$*