

Ermittlung des Stroms im Neutralleiter

E. Hering, Dresden

Der Beitrag behandelt die Regeln für die Ermittlung des Neutralleiterstroms, der dadurch fließen kann, dass Verbraucher einerseits an die Außenleiter und andererseits an den Neutralleiter angeschlossen sind. Diese Regeln gelten nur für überschwingungsfreien (rein sinusförmigen) Strom und für die Grundschwingung überschwingungsbehafteter Ströme.

1 Gleiche Belastung

Herrscht symmetrische Belastung, d. h. haben die von den drei Außenleitern zum Neutralleiter fließenden Ströme gleiche Größe und keine Phasenverschiebung gegenüber der Spannung oder gleichen Phasenverschiebungswinkel, dann heben sie sich gegenseitig auf, so dass der Neutralleiter stromlos ist. Weicht einer der drei Ströme ausschließlich in der Größe (nicht hinsichtlich des Phasenverschiebungswinkels) von den beiden anderen Strömen ab, so fließt im Neutralleiter ein Strom von der Größe dieser Differenz.

2 Ungleiche Belastung

Die einfachen Regeln des Abschnitts 1 gelten nicht, wenn die Größen aller drei Ströme unterschiedlich sind und/oder nicht alle drei Phasenverschiebungswinkel übereinstimmen. Der Neutralleiterstrom kann dann grafisch nach Abschnitt 2.1 oder rechnerisch gemäß Abschnitt 2.2 ermittelt werden. Voraussetzung ist die Kenntnis folgender Fakten:

- Beträge $|I|$ der drei Ströme;
- Phasenverschiebungswinkel φ oder ersatzweise $\cos \varphi$ und Unterscheidung zwischen kapazitiv und induktiv der drei Ströme;
- Phasenfolge (zeitliche Folge) der Spannungen der drei Außenleiter. Sie kann, wie noch mit den Beispielen bewiesen wird, erheblichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Sie entspricht der Reihenfolge ... L1, L2, L3, L1, L2, L3, L1 ... der Außenleiter. Können die Außenleiter nicht identifiziert werden oder ist die Richtigkeit ihrer Kennzeichnung zweifelhaft, so muss die Phasenfolge mit einem so genannten Drehfeldrichtungsanzeiger, der besser „Phasenfolgeanzeiger“ heißen würde, festgestellt werden.

Autor

Dipl.-Ing. (FH) Enno Hering ist Mitglied des AK „Starkstromanlagen bis 1000 V“ des VDE-Bezirksvereins Dresden.

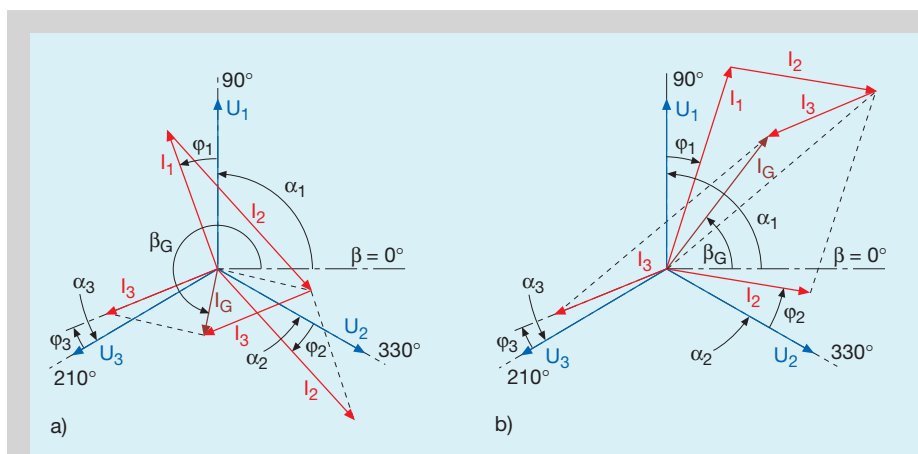
2.1 Grafische Ermittlung

Die grafische Ermittlung geschieht mit Hilfe eines Zeigerdiagramms, z. B. nach Bild 1. Dafür gelten folgende Regeln:

- Das Zeigerdiagramm ist als im Gegenuhrzeigersinn („mathematisch positiver Drehsinn“) drehend zu betrachten. Die Richtungswinkel steigen im Gegenuhrzeigersinn. Der Zeiger einer Größe, die einer anderen Größe voran eilt, ist gegenüber deren Zeiger im Gegenuhrzeigersinn verdreht.
- Die Reihenfolge der Spannungen der Außenleiter L1, L2 und L3 entspricht dem Uhrzeigersinn, weil die Spannung jedes Außenleiters derjenigen des vorigen nacheilt.
- Die Richtungswinkel α der Spannungszeiger im Zeigerdiagramm sind beliebig. Jedoch müssen die Winkel zwischen den Spannungszeigern jeweils 120° betragen. Die Größe der Spannungen spielt hier keine Rolle. Die Spannungszeiger wurden zur Veranschaulichung dennoch in das Bild 1 eingezeichnet. Praktisch genügt es, stattdessen die

Richtungen der Spannungszeiger im Zeigerdiagramm anzugeben, z. B. mit Strichpunktlinien.

- Wenn statt der Phasenverschiebungswinkel φ zwischen Spannungen und Strömen nur die Größen $\cos \varphi$ bekannt sind, müssen sie aus diesen errechnet werden, z. B. mit einem Taschenrechner. Kapazitive Phasenverschiebung ergibt einen positiven Winkel φ , weil der Strom der Spannung voraus eilt. Induktive Phasenverschiebung ergibt wegen der Nacheilung des Stroms einen Winkel φ mit negativem Vorzeichen.
- Die Stromzeiger werden so in das Zeigerdiagramm eingezeichnet, dass ihre Enden in dessen Nullpunkt liegen und dass ihre Richtungen entsprechend den Phasenverschiebungswinkeln φ von den Richtungen α der zugehörigen Spannungszeiger abweichen. Ein positiver Winkel φ ergibt eine Abweichung im Gegenuhrzeigersinn, ein negativer eine solche im Uhrzeigersinn.
- Zur Addition der Ströme wird ein Stromzeigerzug gebildet analog zum Kräftezug (Kraftpfeilzug) der Statik. Das geschieht so: Ein Stromzeiger, z. B. I_1 , verbleibt an seinem Ort mit dem Ende im Nullpunkt des Zeigerdiagramms. Ein weiterer Stromzeiger, z. B. I_2 , wird durch Parallelverschiebung mit seinem Ende an die Spitze des vorigen Stromzeigers versetzt. Das Gleiche geschieht mit dem dritten Stromzeiger. Es ist gleichgültig, mit welchem Stromzeiger begonnen wird. Die Reihenfolge ist ebenfalls beliebig. Sie sollte jedoch nach Möglichkeit so gewählt werden, dass sich die Stromzeiger nicht schnei-



1 Beispiele für die grafische Ermittlung des Stroms im Neutralleiter mit Zeigerdiagramm a) Beispiel 1; b) Beispiel 2, wie a), jedoch mit geänderter Phasenfolge durch Vertauschen der Außenleiter L1 und L2.

U_1, U_2, U_3 Spannungen; I_1, I_2, I_3 Ströme; I_G Gesamtstrom; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ Richtungswinkel der Spannungen; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ Phasenverschiebungswinkel der Ströme; $\beta = 0^\circ$ Bezugsrichtung; β_G Richtungswinkel des Gesamtstroms

Anmerkungen: Die Strichellinien sind Hilfslinien für die Parallelverschiebung von Stromzeigern. Der Neutralleiterstrom (Zeiger nicht dargestellt) ist dem Gesamtstrom gleich, fließt jedoch entgegengesetzt.

Tafel 1 Vorzeichen der Winkelfunktionen und kartesischen Koordinaten

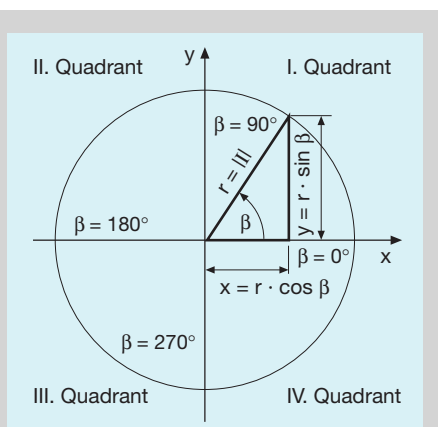
Quadrant	β	Vorzeichen $x = \cos \beta$ $y = \sin \beta$	
I.	0° ... 90°	+	+
II.	90° ... 180°	-	+
III.	180° ... 270°	-	-
IV.	270° ... 360°	+	-

β Winkel; cos und sin Winkelfunktionen;
x und y kartesische Koordinaten

den. Das Schneiden ändert nichts am Ergebnis, kann jedoch verwirren. Im Sonderfall, wenn die drei Stromzeiger ein geschlossenes Dreieck bilden, ist die Summe der Ströme Null, was bedeutet, dass im Neutralleiter kein Strom fließt. Ansonsten stellt ein vierter Stromzeiger, dessen Ende sich im Nullpunkt des Zeigerdiagramms befindet und dessen Spitze an der des dritten Stromzeigers liegt, den Gesamtstrom I_G der drei Ströme dar. Sein Betrag $|I_G|$ und sein Richtungswinkel β_G können aus dem Diagramm abgelesen werden. Der Neutralleiterstrom ist gleich groß, jedoch entgegengerichtet, hat also den Richtungswinkel $\beta_G + 180^\circ$.

2.2 Rechnerische Ermittlung

Gegenüber der grafischen kann die rechnerische Ermittlung mit größerer Präzision durchgeführt werden. Deren Erfolg hängt allerdings von der Genauigkeit der Eingabegrößen ab. Das sehr aufwändige Zeichnen des Zeigerdiagramms kann entfallen. Zur Veranschaulichung ist jedoch dessen skizzenhafte Darstellung vorteilhaft.



2 Kartesische (rechtwinklige) und Polarkoordinaten
Polarkoordinaten: r Radius und Hypotenuse des Dreiecks; β Winkel (Richtungswinkel); $\beta = 0^\circ$ Bezugsrichtung (Polarhalbachse)
Kartesische Koordinaten: x Koordinate in Richtung $\beta = 0^\circ$ und Ankathete des Dreiecks; y Koordinate in Richtung $\beta = 90^\circ$ und Gegenkathete des Dreiecks

Tafel 2 Beispiele für die Berechnung

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Außenleiter und Strom	α	$\cos \varphi$	φ	Koordinatenumwandlung des Stromzeigers				Addition der kartesischen Koordinaten			
				Polar-koordinaten		kartesische Koordinaten		Ende des Stromzeigers		Spitze des Stromzeigers	
				$ I $ in A	$\beta = \alpha + \varphi$	x in A	y in A	x_E in A	y_E in A	$x_E + x$ in A	$y_E + y$ in A
Beispiel 1											
L1 I_1	90°	0,94 kap.	20°	20	110°	- 6,8	18,8	0 a)	0 a)	- 6,8	18,8
L2 I_2	330°	0,95 ind.	- 18°	29	312°	19,4	- 21,6	- 6,8 b)	18,8 b)	12,6	- 2,8
L3 I_3	210°	0,99 ind.	- 8°	16	202°	- 14,8	- 6,0	12,6 c)	- 2,8 c)	- 2,2 d)	- 8,8 d)
Beispiel 2 (wie Beispiel 1, jedoch Verbraucher von L1 und L2 vertauscht)											
L1 I_1	90°	0,95 ind.	- 18°	29	72°	9,0	27,6	0 a)	0 a)	9,0	27,6
L2 I_2	330°	0,94 kap.	20°	20	350°	19,7	- 3,5	9,0 b)	27,6 b)	28,7	24,1
L3 I_3	210°	0,99 ind.	- 8°	16	202°	- 14,8	- 6,0	28,7 c)	24,1 c)	13,9 d)	18,1 d)

α Richtungswinkel des Spannungszeigers (Abweichung von der Bezugsrichtung im Gegenuhrzeigersinn); φ Phasenverschiebungswinkel (Abweichung der Richtung des Stromzeigers von der Richtung des Spannungszeigers im Gegenuhrzeigersinn); β Richtungswinkel des Stromzeigers (Abweichung von der Bezugsrichtung im Gegenuhrzeigersinn); $|I|$ Betrag des Stroms (I_1, I_2, I_3) vom Außenleiter zum Neutralleiter; x Koordinate der Spitze des Stromzeigers in Bezugsrichtung; y Koordinate der Spitze des Stromzeigers in Richtung mit 90° Abweichung von der Bezugsrichtung im Gegenuhrzeigersinn; kap. kapazitiv (Strom eilt der Spannung voraus, und φ ist positiv); ind. induktiv (Strom eilt der Spannung nach, und φ ist negativ);
a) Zeigerende im Nullpunkt des Zeigerdiagramms;
b) Zeigerende an der Spitze des Stromzeigers von L1;
c) Zeigerende an der Spitze des Stromzeigers von L2;
d) Spitze des Stromzeigers von L3 und des Stromzeigerzuges, auch Spitze des Stromzeigers des Gesamtstromes I_G mit den Koordinaten x_G und y_G

Die Regeln a) bis d) aus dem Abschnitt 2.1 sind auch für die Berechnung maßgebend. Die Punkte e) und f) müssen hier nicht befolgt werden, fördern jedoch das Verständnis für die Rechenregeln. Zusätzlich gelten folgende Regeln:

- g) Für den Richtungswinkel β sind 360° und 0° gleichbedeutend. Bei Bedarf können 360° zu ihm addiert oder von ihm subtrahiert werden, z. B. wenn negative Winkel oder solche über 360° auftreten und vermieden werden sollen.
- h) Die positive Richtung der kartesischen (rechtwinkligen) Koordinaten x ist der Richtungswinkel $\beta = 0^\circ$ der Polarkoordinaten. Sie entspricht der nach rechts zeigenden Bezugsrichtung des Zeigerdiagramms. Die positive Richtung der kartesischen Koordinaten y ist der Richtungswinkel $\beta = 90^\circ$ der Polarkoordinaten. Sie zeigt nach oben.
- i) Der Betrag $|I|$ und der Richtungswinkel β der Ströme können als Polarkoordinaten betrachtet werden. Diese müssen zur Vorbereitung der Addition der drei Ströme in die kartesischen Koordinaten x und y umgewandelt werden. Die Anwendung der dafür geltenden Formeln

$$x = |I| \cdot \cos \beta \quad (1)$$

$$y = |I| \cdot \sin \beta \quad (2)$$
 erübrigt sich, wenn auf die „Konver-

tierung“ mit einem wissenschaftlichen Taschenrechner zurückgegriffen wird. In den Bedienungsanleitungen solcher Geräte steht üblicherweise „r“ statt „|I|“ und „ θ “ (eine Version des kleinen Theta) statt „ β “. Für die Vorzeichen der Winkelfunktionen cos und sin und damit der Koordinaten x und y gelten die Angaben im Bild 2 und in der Tafel 1.

- j) Die Koordinaten x der drei Ströme werden addiert. Das Gleiche geschieht mit den y-Koordinaten. Die Summen werden in die Polarkoordinaten $|I_G|$ und β_G umgewandelt, die den Betrag und den Richtungswinkel des Summenstroms I_G ausdrücken. Die dafür geltenden Formeln

$$|I_G| = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\beta_G = \arctan(y/x) \quad (4)$$
 brauchen nicht angewendet zu werden, wenn die Umwandlung mit einem wissenschaftlichen Taschenrechner erfolgt. Der Neutralleiterstrom hat den gleichen Betrag wie der Summenstrom $|I_G|$, fließt jedoch in entgegengesetzter Richtung. Sein Richtungswinkel β_N beträgt darum $\beta_G + 180^\circ$. Die Rechenbeispiele sind zur Platzersparnis in den Tafeln 2 und 3 komprimiert. Solche Tafeln können auch für die Praxis vorteilhaft sein, insbesondere dann, wenn

Tafel 3 Beispiele für die Berechnung – Fortsetzung zur Tafel 2

1	2	3	4
Kartesische Koordinaten von Tafel 2		Polarkoordinaten	
x_G in A	y_G in A	$ I_G $ in A	β_G
Beispiel 1			
-2,2	-8,8	9,1	-104° = 266°
Beispiel 2			
13,9	18,1	22,8	52,5°
x_G und y_G Koordinaten der Stromzeigerspitze des Gesamtstromes; $ I_G $ Betrag des Gesamtstroms und des Neutralleiterstroms; β_G Richtungswinkel des Gesamtstroms Anmerkung: Der Richtungswinkel des Neutralleiterstroms beträgt $\beta_N = \beta_G + 180^\circ$.			

sie als Formblatt vorliegen. Die Größen in den Spalten 2 bis 5 in der Tafel 2 wurden für die Beispiele willkürlich gewählt, sind jedoch die Gleichen wie im Bild 1. Die Größen in den Spalten 6 bis 12 ergeben sich daraus. Ein Vergleich der Ergebnisse in den Spal-

ten 3 und 4 der Tafel 3 zeigt, dass die Änderung der Phasenfolge durch das Vertauschen zweier Außenleiter einen sehr erheblichen Einfluss auf den Gesamtstrom und damit auf den Neutralleiterstrom haben kann. Wenn ein Außenleiter mit stark nacheilendem Strom, der folgende mit stark vorauseilendem Strom und der dritte nur gering oder gar nicht belastet ist, kann der Strom im Neutralleiter größer als in den Außenleitern sein.

3 Belastung durch Stromoberschwingungen

Stromoberschwingungen belasten den Neutralleiter völlig anders als nach den Abschnitten 1 und 2. Sie sind u. a. in [1] bis [6] behandelt. Wenn sie auftreten, überlagern sie sich der Stromgrundschwingung.

4 Bemessung und Überlastschutz des Neutralleiters

Aus verschiedenen Gründen sollten im Allgemeinen keine Kabel mit reduziertem Querschnitt des vierten Leiters (z. B. Drei-

einhalb-Leiter-Kabel) verwendet werden [3]. Wenn eine Überlastung des Neutralleiters möglich ist, muss eine Überstromschutzvorrichtung eingebaut werden, die auch den Neutralleiterstrom überwacht. Beim Ansprechen brauchen nur die Außenleiter abgeschaltet zu werden. In den Neutralleiter dürfen keine Überstromschutzvorrichtungen eingefügt werden, die nur ihn allein unterbrechen, z. B. einpolige Leitungsschutzschalter oder NH-Sicherungen.

Literatur

- [1] Fassbinder, S.: Was heißt hier schon harmonisch? de, München 73 (1998) 1 bis 5.
- [2] Fassbinder, S.: Netzbelastung durch Oberschwingungen (Inhalt entspricht [1]). Sonderdruck Nr. s. 182 – 4/98. Deutsches Kupfer-Institut (DKI), 40474 Düsseldorf.
- [3] Hering, E.: Nachteile von Dreieinhalb-Leiter-Kabeln. Elektropraktiker, Berlin 52(1998)6, S. 547-549.
- [4] Fassbinder, S.: Wir müssen draußen bleiben! Zutritt nur mit 50 Hz! e-Motion, München (1999) 1, S. 32-34.
- [5] Fassbinder, S.: Vor der eigenen Tür gefegt. de, München 74 (1999) 11 bis 20.
- [6] Fassbinder, S.: Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen (Inhalt entspricht [5]). Sonderdruck Nr. s. 185 – 2/2000. DKI.

Berichtigung: Im Beitrag „Vorschriften für Notbeleuchtung ...“ (ep, Heft 6/2001, S.479) wurden bei der technischen Herstellung der Tafel 1 einige Angaben vertauscht. Nachfolgend die korrekte Fassung. Wir bedauern dieses Versehen.

Tafel 1 Anforderungen an die Sicherheitsbeleuchtung nach DIN VDE 0108, Teil 1–8

Anforderungen	Bauliche Anlagen/Räume oder Nutzung							
	Versammlungsstätten, Geschäftshäuser, Ausstellungsräume, Schank- und Speisewirtschaften	Versammlungsstätten, Schank- und Speisewirtschaften mit max. 20 Leuchten	Beherbergungsbetriebe, Hochhäuser, Schulen	Geschlossene Großgaragen	Rettungswege in Arbeitsstätten	Arbeitsplätze mit besonderer Gefährdung	Bühnen, Szenenflächen	Manegen, Sportrennbahnen
Mindestbeleuchtungsstärke in lx	1	1	1	1	1	10 % von E ¹⁾ , mindestens 15	3	15
Maximale Umschaltzeit in s	1	1	15	15	15	0,5	1	1
Nennbetriebsdauer der Ersatzstromquelle in h	3	3	3	1	1	> 1 min ²⁾	3	3
Dauerschaltung der Rettungszeichen	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja	ja
Dauerschaltung für die Beleuchtung der Rettungswege	ja ³⁾	ja ³⁾	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Zulässige Ersatzstromquelle	Zentralbatterie, Gruppenbatterie, mit oder ohne Wechselrichter Schnellbereitschafts-, Sofortbereitschaftsaggregat							
	Einzelbatterien	Einzelbatterien, Ersatzstromaggregat	Einzelbatterien, Ersatzstromaggregat	Einzelbatterien, Ersatzstromaggregat	Einzelbatterien, Ersatzstromaggregat, besonders gesichertes Netz	Einzelbatterien, besonders gesichertes Netz		

1) E¹⁾ der für die Sehaufgabe erforderliche Wert der Beleuchtungsstärke.
 2) Die Betriebsdauer ist abhängig von der Dauer der bestehenden Gefährdung.
 3) Nur für alle Rettungswege außerhalb von Versammlungsräumen, Bühnen, Szenenflächen. Sind die vorgenannten Räume betriebsmäßig verdunkelt, müssen mindestens Türen, Gänge und Stufen durch die Sicherheitsbeleuchtung in Dauerschaltung erkennbar sein.