

Info-Brief Nr. 5

Verlagerungsspannung im Drehstromnetz

1. Verlagerungsspannung im Drehstromnetz

Bei symmetrischem Netzbetrieb und Ungleichheit der Impedanzen in der Verbraucherschaltung sind die Sternspannungen der beiden Schaltungen und somit auch die Sternpunkte nicht mehr deckungsgleich.

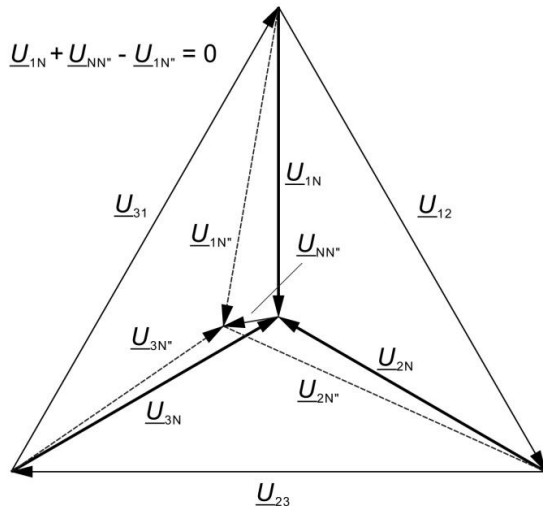


Bild 1
Zeiger der Spannungen im Drehstrom-Dreileitersystem. Zwischen den Sternpunkten besteht eine Spannungsdifferenz, die als Verlagerungsspannung bezeichnet wird und deren Höhe von der Ungleichheit der Impedanzen in der Verbraucherschaltung abhängt.

1.1 Drehstrom-Dreileiternetz

Die geometrische Summe der komplexen Effektivwerte der Leiterströme (siehe Bild 2) ist null und somit gilt:

$$\frac{\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{NN''}}{\underline{Z}''_1} + \frac{\underline{U}_{2N} + \underline{U}_{NN''}}{\underline{Z}''_2} + \frac{\underline{U}_{3N} + \underline{U}_{NN''}}{\underline{Z}''_3} = 0 \quad (1)$$

Daraus ergibt sich:

$$\underline{U}_{NN''} = \frac{1}{3} [(\underline{U}_{1N''} + \underline{U}_{2N''} + \underline{U}_{3N''}) - (\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N})] \quad (2)$$

Bei symmetrischem Netzbetrieb ist $\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N} = 0$ und somit die Spannung $\underline{U}_{NN''}$ gleich der Nullkomponente \underline{U}_0 , die deshalb ebenso als Verlagerungsspannung bezeichnet wird.

$$\underline{U}_{NN''} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1N''} + \underline{U}_{2N''} + \underline{U}_{3N''}) \quad (3)$$

Dann gilt auch:

$$\underline{U}_{NN''} = -\frac{1}{3} [I_1 (\underline{Z}''_2 - \underline{Z}''_1) + I_3 (\underline{Z}''_2 - \underline{Z}''_3)] \quad (4)$$

Der Einflusseffekt auf die Verlagerungsspannung von ungleichen Impedanzen der Verbraucherschaltung (die wiederum ungleiche Stromstärken bewirken) ist bei dieser Formel direkt erkennbar.

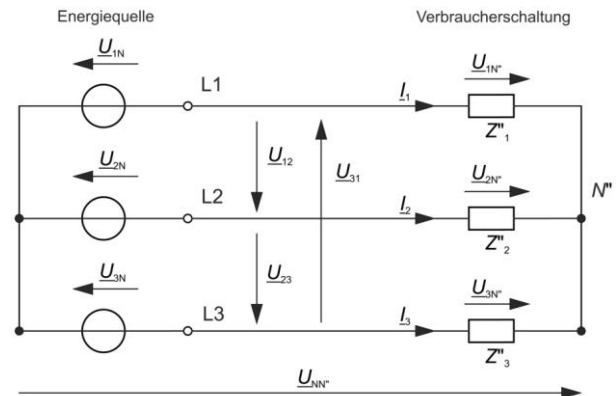


Bild 2
Spannungen im Drehstrom-Dreileitersystem (Kurzschlussimpedanzen der Energiequelle und Längsimpedanzen der Leitung sind vernachlässigt)

Beispiel 1

Drehstrom-Dreileiternetz; sinusförmige Wechselgrößen; Spannungen am Messort / Messmittel:

$$\underline{U}_{12} = 20287 e^{j30^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{23} = 20162 e^{-j90^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{31} = 20345 e^{j150^\circ} \text{ V};$$

Verbraucherschaltung:

$$\underline{Z}''_1 = 30 e^{j25^\circ} \Omega; \quad \underline{Z}''_2 = 28 e^{j30^\circ} \Omega; \quad \underline{Z}''_3 = 32 e^{j35^\circ} \Omega$$

(Sternschaltung; Asymmetrie 7 %).

Wie groß ist die Verlagerungsspannung?

Ergebnisse (Berechnung mit Programm E-1.4.1)

Ströme:

$$\underline{I}_{1''} = 384 e^{-j25^\circ} \text{ A}; \quad \underline{I}_{2''} = 422 e^{-j151^\circ} \text{ A}; \quad \underline{I}_{3''} = 368 e^{j87^\circ} \text{ A}$$

Spannungen an der Verbraucherschaltung:

$$\underline{U}_{1N''} = 11508 e^{-j0^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{2N''} = 11815 e^{-j121^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{3N''} = 11782 e^{j122^\circ} \text{ V}$$

Verlagerungsspannung:

$\underline{U}_{NN''} = 254 e^{-j171^\circ} \text{ V}$ (2 % von $\underline{U}_{1N''}$; entspricht der Spannungsdifferenz zwischen dem Sternpunkt der Verbraucherschaltung und dem Sternpunkt der Energiequelle).

1.2 Drehstrom-Vierleiternetz

Ebenso wie im Drehstrom-Dreileitersystem gilt auch im Drehstrom-Vierleitersystem für symmetrischen Netzbetrieb:

$$\underline{U}_{NN''} = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1N''} + \underline{U}_{2N''} + \underline{U}_{3N''}) = \underline{I}_{NN''} \underline{Z}''_N \quad (5)$$

$$\underline{U}_{NN''} = \underline{U}_0 \text{ (Nullkomponente)}$$

Wir regeln das.

Werden anstelle der Impedanzen der Verbraucherschaltung die entsprechenden Scheinleitwerte verwendet, ergibt sich die Verlagerungsspannung zu:

$$\underline{U}_{NN''} = - \frac{\underline{U}_{1N} \underline{Y}''_1 + \underline{U}_{2N} \underline{Y}''_2 + \underline{U}_{3N} \underline{Y}''_3}{\underline{Y}''_1 + \underline{Y}''_2 + \underline{Y}''_3 + \underline{Y}''_N} \quad (6)$$

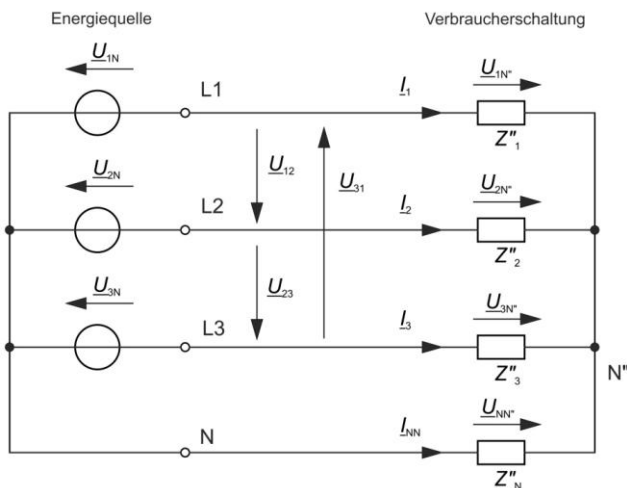


Bild 3

Spannungen im Drehstrom-Vierleitersystem
(Kurzschlussimpedanzen der Energiequelle und Längsimpedanzen der Leitung vernachlässigt)

Beispiel 2

Drehstrom-Vierleiternetz; sinusförmige Wechselgrößen;
Spannungen am Messort / Messmittel:
 $U_{12} = 401,2 \text{ V}$; $U_{23} = 402,5 \text{ V}$; $U_{31} = 401,9 \text{ V}$;
(für den Winkel von U_{12} wird 30° gewählt).

Verbraucherschaltung:

$$\underline{Z}''_1 = 17 e^{j28^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}''_2 = 23 e^{j30^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}''_3 = 28 e^{j34^\circ} \Omega;$$

$$\underline{Z}''_N = 1,0 e^{j4^\circ} \Omega \text{ (Sternschaltung; Asymmetrie 25 \%)}.$$

Wie groß ist die Verlagerungsspannung?

Ergebnisse (Berechnung mit Programm E-1.4.2)

Spannungen an der Verbraucherschaltung:

$$\underline{U}_{1N''} = 226,8 e^{j0,6^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{2N''} = 232,4 e^{-j121,2^\circ} \text{ V};$$

$$\underline{U}_{3N''} = 236,9 e^{j120,7^\circ} \text{ V}$$

Verlagerungsspannung

$$\underline{U}_{NN''} = \underline{U}_0 = 5 e^{-j152^\circ} \text{ V (2 \% von } \underline{U}_{1N''}\text{)}$$

1.3 Messung der Verlagerungsspannung

Die Verlagerungsspannung lässt sich entweder aus den, an einer beliebigen Stelle im Netz von drei Spannungs-

wandlern erfassten Leiter-Erde-Spannungen ermitteln (Summe der Augenblickswerte; Nullkomponente der Spannungen) oder direkt an der Hilfswicklung einer Erdschluss-Löschspule.

Für die Messung der Verlagerungsspannung werden einpolig isolierte Spannungswandler mit einer zusätzlichen Hilfswicklung (Bezeichnung da – dn, früher e – n) ausgerüstet. Zwischen Anfang und Ende (den offenen Enden) der in Reihe geschalteten Hilfswicklungen kann der Summenwert der drei Leiter-Erde-Spannungen erfasst werden. Die Dimensionierung der Hilfswicklungen wird meist so vorgenommen, dass bei einem satten einpoligen Erdschluss die Effektivwerte von Verlagerungsspannung und Leiter-Leiter-Spannung gleich sind.

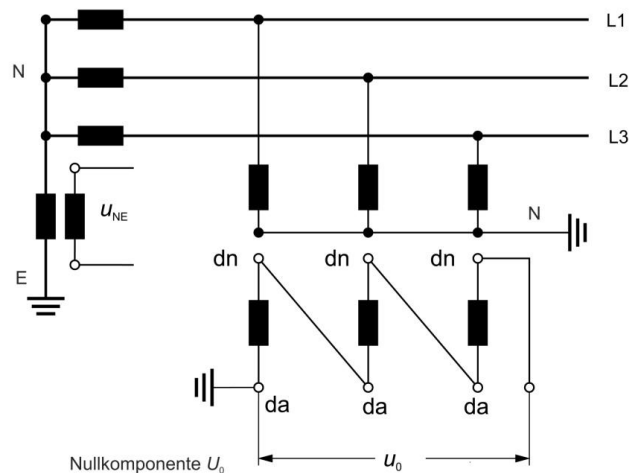


Bild 4

Messwandler-Schaltungen zur Messung der Verlagerungsspannung; bei der Reihenschaltung der Hilfswicklungen wird vorzugsweise die Klemme da (e) der ersten Wicklung geerdet.

Anmerkung

Bei Erdschluss steigen die Leiter-Erde-Spannungen der erdschlussfreien Leiter um den Faktor $\sqrt{3}$ an, sodass die Summenspannung auf der Sekundärseite der Spannungswandler bei gleicher Dimensionierung aller Wicklungen $100 \text{ V} \cdot \sqrt{3}$ betragen würde.

Um jedoch als Wert der Summenspannung 100 V bei Erdschluss zu erhalten, muss für die Spannung der Hilfswicklung

$$\frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} = \frac{100}{3} \quad \text{gelten}$$

(Schreibweise am Typschild des Spannungswandlers).

Einflusseffekt der Messwandler-Fehler

Wegen der Amplituden- und Winkelfehler der Spannungswandler weicht die Summe der drei Spannungen auch im erdschlussfreien Drehstrom-Dreileiternetz geringfügig von null ab.

Beispiel 3

Drehstrom-Dreileiternetz; sinusförmige Wechselgrößen; die Sekundärwicklungen von 3 Spannungswandlern sind in Reihe geschaltet.

$$\underline{U}_{1E} = 100 \text{ V, Fehler: } +0,4 \% / -0,3^\circ;$$

$$\underline{U}_{2E} = 100 \text{ V, Fehler: } -0,25 \% / -0,4^\circ;$$

$$\underline{U}_{3E} = 100 \text{ V, Fehler: } +0,3 \% / +0,3^\circ$$

Wie groß ist die Abweichung der Summenspannung von null?

Ergebnis (Berechnung mit Programm E-1.7.1)

Anstelle von $\underline{U}_\Sigma = 0$ und $\varphi_\Sigma = 0^\circ$ wird angezeigt:

$$\underline{U}_\Sigma^* = 0,68 \text{ V. Das entspricht } 0,7 \% \text{ von } 100 \text{ V. } \varphi_\Sigma^* = 177^\circ$$

1.4 Verlagerungsspannung bei Erdschluss

Eine hohe Verlagerungsspannung ist ein Anzeichen für einen Erdschluss im Netz, weil bei normalen Netzverhältnissen die Asymmetrie der Leiter-Erde-Impedanzen und damit die Verlagerungsspannung gering sind; in erdschlussfreien Netzen sind es nur einige Prozent der Leiter-Erde-Spannung. Wegen der wesentlich besseren Symmetrie der Leiter-Erde-Impedanzen bei Kabeln ist in diesen Netzen die Verlagerungsspannung nochmals deutlich niedriger als in Freileitungsnetzen. - Bei sattem Erdschluss kann die Verlagerungsspannung den vollen Betrag der Leiter-Sternpunkt-Spannung erreichen. Durch den Erdschluss eines Leiters wird im gesamten, galvanisch zusammenhängenden Netz die zugehörige Leiter-Erde-Impedanz weitgehend kurzgeschlossen. Die Erhöhung der Verlagerungsspannung tritt somit unabhängig von der örtlichen Lage des Erdschlusses auf. Der Betrag und der Winkel sind jedoch ortsabhängig; maßgebend dafür sind die Leiter-Leiter-Spannungen und die Leiter-Erde-Impedanzen am Messort. Die Kurvenform und die Frequenz von Netzspannung und Verlagerungsspannung sind nach dem Ende des durch den Erdschluss bewirkten kurzen Einschwingvorganges gleich.

Im Drehstromnetz mit Erdschlusskompensation gilt:

$$\underline{U}_{NE} = \frac{1}{3} [(\underline{U}_{1E} + \underline{U}_{2E} + \underline{U}_{3E}) - (\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N})] \quad (7)$$

Bei symmetrischem Netzbetrieb ist $\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N} = 0$ und somit die Spannung $\underline{U}_{NE} = \underline{U}_0$ (Nullkomponente)

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3} (\underline{U}_{1E} + \underline{U}_{2E} + \underline{U}_{3E}) \quad (8)$$

Die Verlagerungsspannung ergibt sich ebenso aus den Scheinleitwerten zwischen Leiter und Erde, dem Scheinleitwert der Erdschluss-Löschspule und aus den Leiter-Sternpunkt-Spannungen.

Bei Erdschluss eines Leiters wird die Impedanz an der Erdschlussstelle, parallel zur Leiter-Erde-Impedanz dieses Leiters wirksam.

$$\underline{U}_{NE} = - \frac{\underline{U}_{1N} \underline{Y}_{1E} + \underline{U}_{2N} \underline{Y}_{2E} + \underline{U}_{3N} \underline{Y}_{3E}}{\underline{Y}_{1E} + \underline{Y}_{2E} + \underline{Y}_{3E} + \underline{Y}_{NE}} \quad (9)$$

\underline{Y}_{iE} Scheinleitwert zwischen Leiter L_i und Erde; bei Erdschluss gilt: $\underline{Y}_{iE} // \underline{Y}_{iF}$

\underline{Y}_{NE} Scheinleitwert zwischen Sternpunkt des Transformators und Erde (Erdschluss-Löschspule)

Bei Symmetrie der Spannungen \underline{U}_{iN} sowie bei gleichen Leitwerten \underline{Y}_{iE} und erdschlussfreiem Netzzustand, nimmt der Zähler des Bruches und damit die an der Erdschluss-Löschspule auftretende Verlagerungsspannung den Wert null an.

Bei sattem Erdschluss eines Leiters nimmt der zugehörige Leitwert \underline{Y}_{iE} sehr große Werte an, sodass sich $\underline{U}_{NE} \approx \underline{U}_{iN}$ ergibt (für $\underline{Z}_{iE} = 0$, also $\underline{Y}_{iE} = \infty$ ergibt sich ein *unbestimmter Ausdruck!*).

Beispiel 4

Drehstrom-Dreileiternetz; sinusförmige Wechselgrößen; Erdschlusskompensation; Erdschluss auf Leiter L1.

Spannungen am Messort / Messmittel:

$$\underline{U}_{12} = 20,16 e^{j31^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{23} = 20,01 e^{-j90^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{31} = 20,24 e^{j151^\circ} \text{ kV};$$

Leiter-Erde-Kapazitäten:

$$C_1 = 6,2 \mu\text{F}; \quad C_2 = 5,9 \mu\text{F}; \quad C_3 = 6,1 \mu\text{F}$$

(Asymmetrie 3 %);

Leitungsableitungen (Leiter-Erde):

$$R_1 = 102 \text{ k}\Omega; \quad R_2 = 105 \text{ k}\Omega; \quad R_3 = 98 \text{ k}\Omega$$

(Asymmetrie 4 %);

Erdschluss auf Leiter L1: Widerstand $Z_F = 25 \Omega$;

Erdschluss-Löschspule: Impedanz $\underline{Z}_{NE} = 173 e^{j86^\circ} \Omega$ (Induktivität $L = 0,55 \text{ H}$; Kupferwiderstand $R = 9 \Omega$; Eisenverluste $R = 7000 \Omega$).

Welchen Betrag und Winkel haben die Leiter-Erde-Spannungen und die Verlagerungsspannung?

Ergebnisse (Berechnung mit Programm E-1.7.2)

$$\underline{U}_{1E} = 0,15 e^{-j13^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{2E} = 20,05 e^{-j150^\circ} \text{ kV};$$

$$\underline{U}_{3E} = 20,09 e^{j150^\circ} \text{ kV}$$

$$\text{Verlagerungsspannung } \underline{U}_{NE} = 11,55 e^{-j180^\circ} \text{ kV}$$

Wir regeln das.

Die Leiter-Leiter-Spannungen werden durch den Erdschluss nicht verändert, denn es gilt:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{1E} - \underline{U}_{2E} \\ = 0,15 e^{-j13^\circ} \text{ kV} - 20,05 e^{-j150^\circ} \text{ kV} = 20,16 e^{j31^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_{2E} - \underline{U}_{3E} \\ = 20,05 e^{-j150^\circ} \text{ kV} - 20,09 e^{j150^\circ} \text{ kV} = 20,01 e^{-j90^\circ} \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{U}_{3E} - \underline{U}_{1E} \\ = 20,09 e^{j150^\circ} \text{ kV} - 0,15 e^{-j13^\circ} \text{ kV} = 20,24 e^{j150^\circ} \text{ kV}$$

1.5 Spannungsverlauf bei Erdschlusseintritt

Bei Erdschlusseintritt laufen innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne drei Vorgänge gleichzeitig ab (siehe Bild 5).

- Die Leiter-Erde-Spannung des Leiters mit Erdschluss bricht zusammen; bei sattem Erdschluss geht diese Spannung auf null.
- Die Augenblickswerte der Leiter-Erde-Spannungen der beiden erdschlussfreien Leiter springen auf den Augenblickswert der zugeordneten Leiter-Leiter-Spannung.
- Der Augenblickswert der Verlagerungsspannung steigt sprunghaft vom normalen Betriebswert (einige Volt) auf einen Wert an, der bei sattem Erdschluss dem Augenblickswert der Leiter-Sternpunkt-Spannung entspricht.

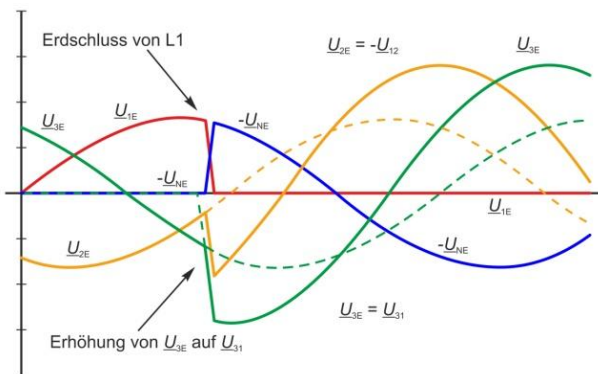


Bild 5

Verlauf der Momentanwerte u_{1N} , u_{2N} , u_{3N} , u_{NE} vor und nach einem einpoligen Erdschluss

Diese, bei einem Erdschluss auftretenden „Schaltvorgänge“ bewirken eine kurzzeitige hochfrequente Schwingung (Einschwingvorgang, Zündschwingung), die sich zu der Grundschiwingung der Verlagerungsspannung addiert und damit deren zeitlichen Verlauf wesentlich bestimmt. Für die Betrachtung des stationären Zustandes (Dauererdschluss) hat dieser Einschwingvorgang aber keine Bedeutung.

Nach dem Erdschlusseintritt verläuft die Verlagerungsspannung mit umgekehrtem Vorzeichen in direkter Fortsetzung des vorangegangenen Verlaufes (Amplitude und Winkel) der dann bis auf null abgesunkenen Leiter-Erde-Spannung.

Leiter-Leiter-Spannungen

In Netzen mit Erdschlusskompensation wird (im Gegensatz zur starren Erdung des Sternpunktes der Energiequelle) durch einen Erdschluss eines Leiters der zugehörige Strang der Energiequelle nicht kurzgeschlossen. Deren Strangspannungen und damit ebenso die Leiter-Leiter-Spannungen bleiben bei einem einpoligen Dauererdschluss unverändert.

Liegt ein satter Erdschluss auf z.B. Leiter L1 dauernd vor (starke Ungleichheit der Leiter-Erde-Impedanzen), dann ergeben sich bei symmetrischen Leiter-Leiter-Spannungen:

$$\underline{U}_{1E} = \underline{U}_{1N} + \underline{U}_{NE} = 0$$

$$\underline{U}_{2E} = \underline{U}_{1E} - \underline{U}_{12} = -\underline{U}_{12} = \underline{U}_{12} e^{-j150^\circ}$$

$$\underline{U}_{3E} = \underline{U}_{2E} - \underline{U}_{23} = -\underline{U}_{12} - \underline{U}_{23} = \underline{U}_{31} e^{j150^\circ}$$

d.h., die Leiter-Erde-Spannungen der beiden erdschlussfreien Leiter haben die gleichen Beträge wie die zugeordneten Leiter-Leiter-Spannungen; die Winkel von \underline{U}_{3E} und \underline{U}_{31} sind gleich, die von \underline{U}_{2E} und \underline{U}_{12} haben zwar den gleichen Betrag, jedoch gegensinnige Vorzeichen (siehe Bild 5).

Verfasser: Helmut Karger

Die für die Beispiele verwendeten EXCEL-Programme können abgerufen werden unter:

www.a-eberle.de

(Download Center)

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / 1005-1-D-1-001-04.docx