

Unterschiedliche Ausprägungen der Erdimpedanzanpassung in Distanzschutzgeräten oder Welche Impedanz misst ein digitaler Distanzschutz?

Steffen Kaiser, OMICRON

Einleitung

Verschiedene Typen von Distanzschutzgeräten nutzen unterschiedliche Algorithmen, um aus den gemessenen Strömen und Spannungen die Impedanz bis zum Fehlerort zu berechnen. Diese Impedanzen unterscheiden sich unter bestimmten Umständen in ihren Berechnungs-Ergebnissen. Hierzu ein Beispiel.

An drei unterschiedlichen Distanzschutzgeräten (Typ A, Typ B, Typ C) wird ein einpoliger L1-Erde-Fehler simuliert. Jedes Relais misst folgende Spannung und Ströme:

$$U_{L1E} = 20 \text{ V } e^{j0^\circ},$$

$$I_{L1} = -I_E = 2 \text{ A } e^{-j30^\circ}.$$

Die Distanzschutzfunktionen liefern folgende Ergebnisse:

Typ A berechnet: $X = 4,4 \text{ Ohm}$; $R = 7,0 \text{ Ohm}$,

Typ B berechnet: $X = 4,2 \text{ Ohm}$; $R = 6,2 \text{ Ohm}$,

Typ C berechnet: $X = 4,2 \text{ Ohm}$; $R = 8,2 \text{ Ohm}$.

Die Differenzen werden im Besonderen durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Erdimpedanz-

anpassung verursacht. Dieser Beitrag beschreibt diese Algorithmen und geht auf die Berücksichtigung bei der Prüfung von Distanzschutzgeräten ein.

Grundlagen

Eine Distanzschutzeinrichtung misst die Impedanz zur Bestimmung des Kurzschlussortes. Bild 1 zeigt das Ersatzschaltbild einer zweiseitig gespeisten Leitung mit einem einpoligen Fehler auf Phase L1. Der Distanzschutz misst die Spannungen und Ströme am Einbauort M. Die Maschengleichung $\underline{U}_{L1E} = \underline{I}_{L1} \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E + R_F \cdot \underline{I}_F$ ist die grundlegende Gleichung der Distanzmessung. Problematisch ist, dass der Term $R_F \cdot \underline{I}_F$ nicht bekannt ist. Insbesondere \underline{I}_F setzt sich aus den Kurzschlussströmen von der linken und rechten Seite der Leitung zusammen und erzeugt so über R_F einen unbekanntem Spannungsabfall. Distanzschutzalgorithmen müssen deshalb zur Lösung der Gleichung Vereinfachungen annehmen. Der Term $\underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E$ wird hingegen unter Nutzung der so genannten Erdimpedanzanpassung aufgelöst.

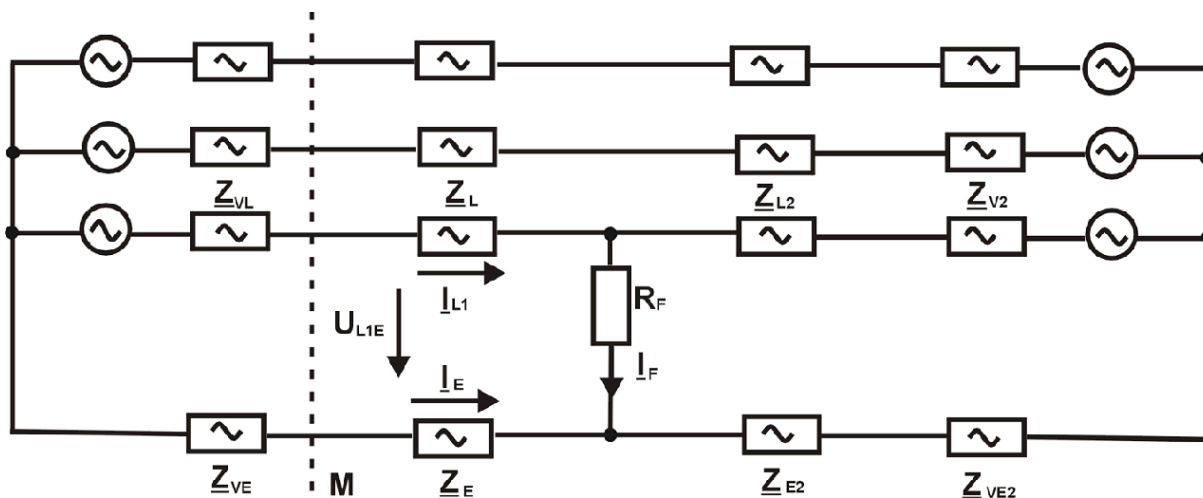


Bild1: Einpoliger Fehler auf einer zweiseitig gespeisten Leitung

- M: Messstelle
- \underline{Z}_L : Leitungsimpedanz von M bis zur Fehlerstelle
- \underline{Z}_E : Erdimpedanz bis zur Fehlerstelle
- R_F : Lichtbogenwiderstand
- \underline{Z}_{L2} : Leitungsimpedanz von der Fehlerstelle bis zum Ende der Leitung
- \underline{Z}_{E2} : Erdimpedanz von der Fehlerstelle bis zum Ende der Leitung
- \underline{Z}_{Vx} : Impedanzen der vorgelagerten Netze

Faktoren zur Erdimpedanzanpassung

Faktoren zur Erdimpedanzanpassung (K-Faktor) sind Konstanten einer Leitung, welche das Verhältnis zwischen Leiterimpedanzen und Erdimpedanzen beschreiben. Diese Konstanten werden zur Berechnung der Fehlerentfernung bei Erdkurzschlüssen benötigt. Mathematisch wird eine Leiter-Erde-Schleifenimpedanz Z_S in zwei Impedanzen zerlegt, die Leiterimpedanz und die Erdimpedanz. Im Fall eines metallischen Kurzschlusses gilt also:

$$\begin{aligned} Z_S &= Z_L + Z_E \\ Z_L &= R_L + j \cdot X_L \\ Z_E &= R_E + j \cdot X_E \end{aligned}$$

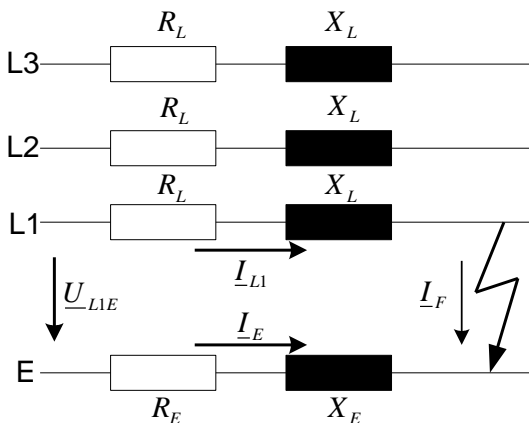


Bild 2: Leitungsstück mit Kurzschluss L1-Erde

Das komplexe Verhältnis

$$\boxed{K_L = Z_E / Z_L} \quad (\text{Gl. 1})$$

ist eine vom Fehlerort unabhängige Konstante einer Leitung und beschreibt das Verhältnis zwischen Leiterimpedanzen und Erdimpedanz. Eine andere übliche Darstellung dieser Konstante ist

$$\boxed{K_0 = Z_0 / Z_L} \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei Z_0 die Nullimpedanz einer Leitung darstellt. K_L und K_0 können über die Beziehung $K_L = (K_0 - 1) / 3$ direkt ineinander umgerechnet werden.

Eine weitere Ausprägung der Konstante zur Erdimpedanzanpassung ist das reelle Wertepaar:

$$\boxed{\begin{aligned} K_r &= R_E / R_L \\ K_x &= X_E / X_L \end{aligned}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Während K_L und K_0 direkt ineinander umgerechnet werden können, benötigt man zur Umrechnung zwischen K_L und dem Wertepaar (K_r, K_x) eine weitere Leitungskonstante, und zwar das Verhältnis X_L / R_L . Die Rechenvorschrift zur Transformation lautet:

$$\underline{K}_L = K_r / (1 + j \cdot R_L / X_L) + K_x / (1 - j \cdot X_L / R_L) \quad (\text{Gl. 4})$$

Das Verhältnis X_L / R_L ist der Tangens des Leitungswinkels φ_L . Das heißt, dass die Umrechnung der K-Faktoren vom Leitungswinkel abhängig ist. Dieses Faktum ist bereits ein Hinweis, dass Algorithmen zur Impedanzberechnung, welche unterschiedliche K-Faktoren nutzen, nicht in jedem Fall gleiche Ergebnisse liefern.

Distanzschutzalgorithmen

Distanzschutzalgorithmus Typ A "komplexes KL"

Algorithmen vom Typ A nutzen den komplexen Faktor \underline{K}_L zur Berechnung der Impedanz einer Schleife Leiter L_x - Erde nach folgendem Ansatz:

$$\underline{U}_{LxE} = \underline{I}_{Lx} \cdot \underline{Z}_{Lx} - \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E \quad (\text{Gl. 5})$$

Durch Ersetzen von $Z_E = K_L \cdot Z_L$ erhält man:

$$\underline{U}_{LxE} = \underline{I}_{Lx} \cdot \underline{Z}_L - \underline{I}_E \cdot \underline{K}_L \cdot \underline{Z}_L \quad (\text{Gl. 6})$$

Zur Vereinfachung unserer Betrachtung setzen wir $\underline{I} = \underline{I}_{Lx} = -\underline{I}_E = \underline{I}_F$, und zur Vereinfachung der Schreibweise $\underline{U} = \underline{U}_{LxE}$. \underline{U} und \underline{I} sind damit die vom Relais gemessenen Spannungen und Ströme einer Leiter-Erde-Schleife. Nach der gesuchten Impedanz aufgelöst, ergibt die Gleichung dann:

$$\boxed{\underline{Z}_{TypA} = R_{TypA} + jX_{TypA} = \frac{\underline{U} / \underline{I}}{1 + \underline{K}_L}} \quad (\text{Gl. 7})$$

Distanzschutzalgorithmus Typ B "RE/RL, XE/XL"

Relais vom Typ B nutzen das Wertepaar K_r und K_x zur Berechnung der Impedanz nach folgendem Ansatz:

$$\underline{U}_{LxE} = \underline{I}_{Lx} \cdot (R_L + j X_L) - \underline{I}_E \cdot (R_E + j X_E) \quad (\text{Gl. 8})$$

Durch Ersetzen von $R_E = K_r \cdot R_L$ und $X_E = K_x \cdot X_L$ erhält man:

$$\underline{U}_{LxE} = \underline{I}_{Lx} \cdot (R_L + j X_L) - \underline{I}_E \cdot (K_r \cdot R_L + j K_x \cdot X_L) \quad (\text{Gl. 9})$$

Zur Vereinfachung unserer Betrachtung setzen wir $\underline{I} = \underline{I}_{Lx} = -\underline{I}_E = \underline{I}_F$, und zur Vereinfachung der Schreibweise $\underline{U} = \underline{U}_{LxE}$. Nach der gesuchten Impedanz aufgelöst, ergibt die Gleichung dann:

$$\boxed{\begin{aligned} X_{TypB} &= \frac{\text{Im}\{\underline{U} / \underline{I}\}}{1 + K_x} \\ R_{TypB} &= \frac{\text{Re}\{\underline{U} / \underline{I}\}}{1 + K_r} \end{aligned}} \quad (\text{Gl. 10})$$

Distanzschutzalgorithmus Typ C "Lichtbogen separiert"

Relais vom Typ C nutzen zur Berechnung von X_L den gleichen Ansatz wie Typ B.

Unterschiedlich ist die Behandlung des ohmschen Anteils. Im Ansatz wird der Lichtbogenwiderstand R_F mit betrachtet. Die im Typ C angewandte Vereinfachung liegt in der Annahme, dass der Strom I_F gleich dem Leiterstrom ist.

Die Idee ist hier, den Lichtbogenwiderstand und den Widerstand der Leitung zusammenzufassen. In anderen Worten ausgedrückt, zieht man vom ohmschen Anteil der Schleifenimpedanz ($\underline{U}/\underline{I}$) den Erdanteil ab. Der Erdanteil lässt sich aus dem berechneten X_L unter der Zuhilfenahme der Konstanten K_r und dem Leitungswinkel bestimmen.

$$X_{TypC} = \frac{\text{Im}\{\underline{U}/\underline{I}\}}{1 + K_x} \quad \text{Gl. (11)}$$

$$R_{TypC} = \text{Re}\{\underline{U}/\underline{I}\} - X_{TypC} \cdot \text{atn}(\varphi_L) \cdot K_r$$

Interpretation der Ergebnisse der Algorithmus

Unter der angewandten Vereinfachung ($\underline{I}_{L1} = I_F = -I_E$), lassen sich die Ergebnisse der unterschiedlichen Algorithmen gut interpretieren. Tabelle 1 fasst die Berechnungsformeln aus dem vorhergehenden Kapitel zusammen.

	$R_{Mess} =$	$X_{Mess} =$
Typ A	$\text{Im}\left\{\frac{\underline{U}/\underline{I}}{1 + \underline{K}_L}\right\}$	$\text{Re}\left\{\frac{\underline{U}/\underline{I}}{1 + \underline{K}_L}\right\}$
Typ B	$\frac{\text{Im}\{\underline{U}/\underline{I}\}}{1 + K_x}$	$\frac{\text{Re}\{\underline{U}/\underline{I}\}}{1 + K_R}$
Typ C	$\frac{\text{Im}\{\underline{U}/\underline{I}\}}{1 + K_x}$	$\text{Re}\{\underline{U}/\underline{I}\} - X_{TypC} \cdot \text{atn}(\varphi_L) \cdot K_r$

Tabelle 1: Zusammenfassung der Distanzschutzalgorithmen

Der Term $\underline{U}/\underline{I}$ ist die Schleifenimpedanz \underline{Z}_s . Diese Schleifenimpedanz setzt sich aus Z_L , R_F und Z_E zusammen. Im Koeffizientenvergleich mit dem Ersatzschaltbild Bild 2, lassen sich die Formeln wie folgt interpretieren:

	$R_{Mess} =$	$X_{Mess} =$
Typ A	$X_L + \text{Im}\{R_F / (1 + \underline{K}_L)\}$	$R_L + \text{Re}\{R_F / (1 + \underline{K}_L)\}$
Typ B	X_L	$R_L + R_F / (1 + K_r)$
Typ C	X_L	$R_L + R_F$

Tabelle 2: Interpretation der Distanzschutzalgorithmen

Die vom Schutz gemessene Impedanz $\underline{Z}_{Mess} = R_{Mess} + j X_{Mess}$ setzt sich aus dem Leitungssegment \underline{Z}_L und einem "Anteil" des Lichtbogenwiderstandes zusammen. Der Anteil des Lichtbogenfehlers wird durch einen typspezifischen Faktor bestimmt.

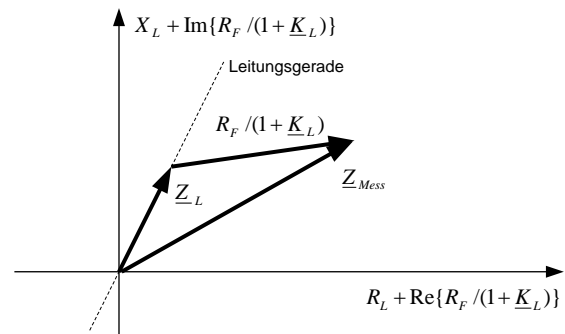


Bild 3: Zeigerbild Typ A "komplexes \underline{K}_L "

Bei Relais vom Typ A kann der Faktor komplex eingestellt werden. In diesem Fall entsteht auch ein komplexer Lichtbogenanteil.

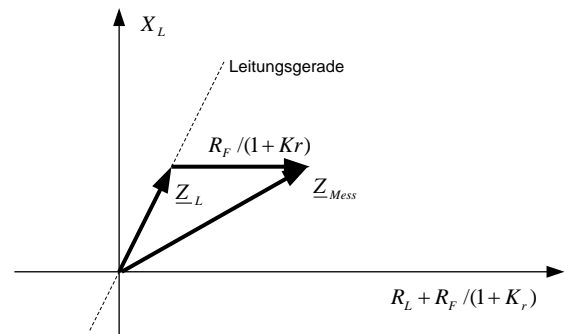


Bild 4: Zeigerbild Typ B "RE/RL, XE/XL"

Relais vom Typ B kompensieren den Lichtbogenwiderstand mit dem realen Faktor $1/(1 + K_r)$.

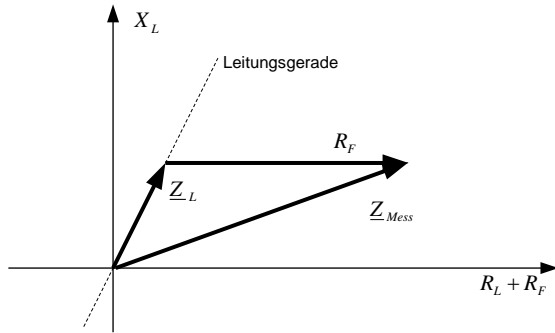


Bild 5: Zeigerbild Typ C "Lichtbogen separiert"

Relais vom Typ C bilden ihren Messwert ohne Kompensation des Lichtbogens.

Die Relais Typen A, B und C unterscheiden sich in der Definition der zu messenden Impedanz!

- Damit verändert sich die Skalierung in der Impedanzebene. Die exakte Achsenbezeichnung zeigen die Bilder 3, 4 und 5.
- Das heißt auch, dass sich diese Impedanzen nicht in ein und derselben Impedanzebene vergleichen lassen.
- Befindet man sich auf der Leitungsgeraden ($R_F = 0$), so liefern alle Distanzschutzalgorithmen das gleiche Ergebnis (R_L und X_L).
- Bei Abweichungen von der Leitungsgeraden wird der Lichtbogenwiderstand in verschiedenen großen "Portionen" auf die Leitungsimpedanz Z_L addiert.

Alle Verfahren erfüllen im vollen Umfang ihre bestimmungsgemäße Funktion. Bei der Einstellung der Zonen und bei der Prüfung muss aber das Verhalten berücksichtigt werden!

Berücksichtigung der Erdimpedanzanpassung bei der Prüfung

In der Prüfsoftware Test Universe sind die verschiedenen Arten von Algorithmen implementiert. Über den Dialog "Distanzschutzeinstellungen" (Bild 6) wird dem Prüfsystem mitgeteilt, wie groß die Erdimpedanzfaktoren sind und welche Algorithmen der Prüfling nutzt. Abhängig von diesen Algorithmen berechnet die Prüfsoftware die Ströme und Spannungen genau so, dass die Impedanzen zwischen Prüfsoftware und Distanzschutz übereinstimmen. Weichen die Algorithmen zwischen Prüfsoftware und Relais ab, so kann es zu Abweichungen in den Prüfergebnissen kommen.

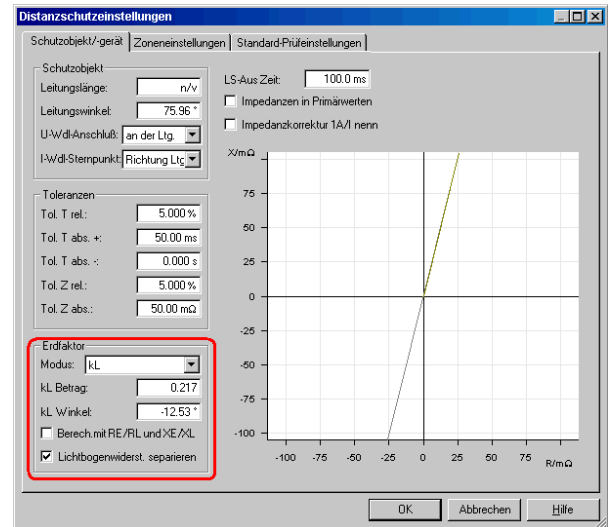


Bild 6: Dialog "Test Objekt - Distanzschutz"

Die Einstellung "Modus" gibt die Art der Erdimpedanzfaktoren an, in der die Einstellung erfolgt (K_L , K_0 oder R_E/R_L). Der Algorithmus wird durch diese Einstellung nicht beeinflusst! Die Auswahl des Algorithmus erfolgt durch die Einstellungen gemäß Tabelle 3.

Typ	Einstellung
Typ A "komplexes K_L "	<input type="checkbox"/> Berech. mit R_E/R_L und X_E/X_L <input type="checkbox"/> Lichtbogenwiderst. separieren
Typ B " R_E/R_L , X_E/X_L "	<input checked="" type="checkbox"/> Berech. mit R_E/R_L und X_E/X_L <input type="checkbox"/> Lichtbogenwiderst. separieren
Typ C " Lichtbogen separiert"	<input type="checkbox"/> Berech. mit R_E/R_L und X_E/X_L <input checked="" type="checkbox"/> Lichtbogenwiderst. separieren

Tabelle 3: Typeneinstellung in Test Universe

Woher bekommt man die Information zur Einstellung?

Welche Algorithmen verwendet werden, entnimmt man den Relaishandbüchern. Leider wird diese Information nicht immer veröffentlicht. Deshalb hier einige Beispiele:

Typ	Relais
Typ A "komplexes K_L "	REL 316, Relais mit MHO- Charakteristik
Typ B " RE/RL, XE/XL"	7SA5**,7SA6**
Typ C " Lichtbogen separiert"	SEL321, SEL421, REL4**, Rel5**, LFZR, EPAC, MICOM (gilt nur für polygonale Zonen! Bei eingestellten MHO-Charakteristiken, gilt Typ A!)

Tabelle 4: Beispiele für Relais Typen (Angaben ohne Gewähr)

Im Zweifelsfall kann über das in der Einführung genannte Beispiel das Verhalten ausgetestet werden. Dazu muss die Reichweite einer Zone zwischen die oben genannten Punkte gelegt werden. Über die gemessene Auslösezeit kann man dann auf den im Relais verwendeten Algorithmus schlussfolgern. Die Parameter der zu schützenden Leitung bei 100% Leitungslänge sind:

$$X_{L100\%} = 10 \text{ Ohm,}$$

$$R_{L100\%} = 2,5 \text{ Ohm,}$$

$$X_{E100\%} = 5 \text{ Ohm,}$$

$$R_{E100\%} = 1 \text{ Ohm.}$$

Aus diesen Parametern lassen sich die notwendigen Einstellungen berechnen:

$$\text{Leitungswinkel: } 75,96^\circ$$

$$K_r = RE/RL = 0,4$$

$$K_x = XE/XL = 0,2$$

$$K_L = 0,217 e^{-j 12,53^\circ}.$$

Zusammenfassung

Distanzschutzrelais definieren je nach Typ die zu messende Impedanz unterschiedlich. Die Differenzen liegen in der Art der Erdimpedanzanpassung und der damit verbundenen Kompensierung des Lichtbogenwiderstandes.

Die Definition der Messimpedanz muss sowohl in den Einstellungen der Zone, als auch in der Prüfung berücksichtigt werden.

Mit der Prüfsoftware Test Universe sind die o.g. Typen von Distanzrelais prüfbar. Die Prüfung erfolgt komfortabel in der dem Relais eigenen Definitionen der Impedanz.

Literatur

- [1] SEL2RIO Converter A.Dirks 1999
- [2] Gerhard Ziegler: "Numerical Distance Protection" 1999
- [3] J. Roberts, A.Guzman, E.O. Schweitzer III – "Z = U/I does not make a distance relais" 1993
- [4] Digitaler Abzweigschutz 7SA513 V3.2 – Benutzerhandbuch, SIEMENS

OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 140 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Niederlassungen in Europa, Nordamerika, Südostasien, Australien und im Nahen Osten, ein weltumspannendes Netz von Vertriebspartnern sowie etablierte Plattformen für den internationalen Erfahrungsaustausch stellen sicher, dass das breite und tiefe Anwendungswissen und der erstklassige Kundenservice allen Anwendern zur Verfügung steht.

Europa, Naher Osten, Afrika
OMICRON electronics GmbH
Oberes Ried 1
6833 Klaus, Austria
Tel.: +43 5523 507-0
Fax: +43 5523 507-999
info@omicron.at

Nord- und Lateinamerika
OMICRON electronics Corp. USA
12 Greenway Plaza, Suite 1510
Houston, TX 77046, USA
Tel.: +1 713 830-4660
+1 800-OMICRON
Fax: +1 713 830-4661
info@omicronusa.com

Asien, Pazifischer Raum
OMICRON electronics Asia Limited
Suite 2006, 20/F, Tower 2
The Gateway, Harbour City
Kowloon, Hong Kong S.A.R.
Tel.: +852 3767 5500
Fax: +852 3767 5400
info@asia.omicron.at