

Probleme mit Rund- oder Flachkabeln?

In vielen Bereichen der Installationstechnik werden 5-Leiter-Rundkabel eingesetzt. Für Installationen zum Beispiel in Hohldecken, Doppelböden oder Brüstungskanälen haben sich auch Flachkabel bewährt. In diesem Beitrag wird ausschliesslich der weit verbreitete Querschnitt von 2,5 mm² behandelt. In Bezug auf elektromagnetische und belastungstechnische Verträglichkeiten gibt es wiederholt Verunsicherungen. Es werden verschiedene Aspekte betreffend Störfelder, Oberschwingungsabhängige Belastbarkeit sowie Installationstechnik aufgezeigt.

Martin Arnold/Henrik Lowak

Oberschwingungen entstehen bei nicht linearen Verbrauchern, welche den Stromfluss durch gesteuerte oder ungesteuerte Ventile regeln. Solche Ventile sind im einfachen Fall Dioden (ungesteuerte Ventile) oder als gesteuerte Variante hauptsächlich Thyristoren (GTO und IGBT). Mittlerweile ist praktisch jedes elektronische Gerät im einphasigen Consumer-Bereich mit einem stark überschwingungserzeugenden Netzteil versehen.

Belastungen N-Leiter

Oberschwingungsströme schränken indirekt die Auslastung der Polleiter ein. Da sich im Neutralleiter die ungeraden, durch drei teilbaren, harmonischen Oberschwingungsströme aller Polleiter addieren, sind die Neutralleiterströme für die maximal erlaubte Belastung von entscheidender Bedeutung. Hauptaugenmerk gilt dabei dem 150-Hz-Anteil.

Aufgrund der Massierung von Verbrauchern des gleichen Typs wie PCs und deren Peripheriegeräte entsteht eine stark verzerrte Stromform, die gegenüber ihrem Effektivwert einen hohen Spitzenwert besitzt.

Es können demnach Situationen auftreten, wo der Neutralleiter bereits ausgelastet ist, obwohl es die Polleiter noch lange nicht sind. Vorgeschaltete Sicherungen erlauben noch höhere Polleiterströme. Man kann sich also in falscher

Sicherheit wiegen. Mit anderen Worten, selbst wenn die Polleiter noch deutliche Reserven haben, dürften keine weiteren unsymmetrischen und/oder Oberschwingungen erzeugenden Verbraucher zugeschaltet werden.

Wenn die Polleiter in Richtung Vollast betrieben werden, kann dies unter bestimmten Umständen zu einer Überlastung des Neutralleiters führen. Anhand von Messresultaten aus der Praxis waren die Verhältnisse bei zwei untersuchten Kabeln zu klären. Die zentrale Frage dabei war, ob eine kabelbezogene Überlastung unter Einhaltung aller Vorschriften und Vorgaben überhaupt auftreten könnte. Verlegungsbezogene Erwärmungsuntersuchungen wurden in diesem Rahmen nicht vorgenommen. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass Umstände, welche mit Reduktionsfaktoren aus der NIN verbunden sind, vorschriftsgemäss zu behandeln sind.

n	1	3	5	7	9
Pegel	1	0,87	0,67	0,46	0,24

Tabelle 1 Pegel der Oberschwingungen bis n=9 gemäss Bild 1.

Auslastbarkeit und Wirkleistung

Oberschwingungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Auslastbarkeit von Leitungen. Idealerweise müsste nur so viel Strom fliessen, wie er der Wirkleistung entspricht. In der Realität fliessen aber noch viele andere Ströme in der Leitung und belasten diese genauso wie die Wirkanteile. Diese, der Blindleistung zugehörigen Ströme lassen sich der Grundschwingungsblindleistung (50 Hz) und der Oberschwingungsblindleistung zuordnen.

Optimal wäre es, ein Netz mit besonders viel Wirkleistung zu belasten, doch gibt es ungünstige Konstellationen, wo Verbraucher nur aus PCs oder ähnlichen Oberschwingungserzeugern bestehen und eine solche Vorstellung zunichte machen. Ein typisches Beispiel ist ein Bürogebäude mit Hunderten von PCs. Im Folgenden wird ein Beispiel betrachtet, das auf Messwerten basiert, welche bei einer früheren Untersuchung gewonnen wurden (siehe ET 9/02 Neutralleiterströme)

Für die erzeugten Oberschwingungen wird das Spektrum aus Bild 1 zu-

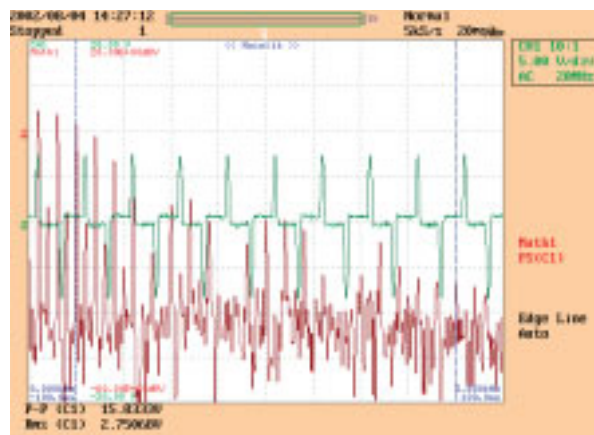


Bild 1 Typische Stromaufnahme dreier parallel gespeister PCs ohne PFC. horizontal: 250 Hz/Gitterabstand, vertikal: 10 dB/Gitterabstand ($I_{RMS} = 10^{(dB/20)}$)

5-Leiter-Kabel 2,5 mm ²	max. zulässiger Strom gem. Hersteller	Kabeloberflächen- temperatur bei T _{Umgebung} = 22,5 °C	Kabel- wärmung _T	Extrapolierter max. verträg- licher Strom bei _T = 40 °C
Flachkabel	16 A	55,9 °C	33,4 °C	26,3 A
Rundkabel TT	16 A	58,3 °C	35,8 °C	25,4 A

Tabelle 2 Labortest für 5-Leiterkabel. Messresultate bei stationärer Endtemperatur.
Für die Extrapolation benutzte Formel: $T = 30\text{ °C} + 40\text{ °K} \cdot (I_{\text{IST}}/I_{\text{MAX}})^2$

grunde gelegt. Die Pegel der Oberschwingungen (bis n=9) sind in Tabelle 1 numerisch zusammengestellt. Die Werte sind auf die Grundschwingung normiert. Daraus abgeleitete Werte:

- Pegel des Gesamteffektivwertes:
 $I_{\text{tot}}/I_1 = 1,57$
- Pegel der Oberschwingung n = 3:
 $I_3/I_1 = 0,87$
- Pegel der Oberschwingungen n = 3, 9:
 $I_{3+9}/I_1 = 0,9$

Im folgenden Rechenbeispiel wird der Gesamteffektivwert eines Polleiterstromes auf die maximal zugelassene **16 A** gesetzt.

Daraus ergeben sich folgende konkreten Stromwerte:

- $I_{\text{tot}} = 16\text{ A}$
Gesamtstrom je Polleiter
- $I_1 = 10,2\text{ A}$
50-Hz-Anteil je Polleiter
- $I_{\text{OS}} = 12,4\text{ A}$
Oberschwingungsanteil je Polleiter
- $I_{3+9} = 9,2\text{ A}$
Oberschw.-anteil n = 3, 9 je Polleiter
- $I_N = 27,5\text{ A}$
Neutralleiterstrom (besteht aus Oberschw. n = 3, 9)

Der N-Leiter führt jetzt den 1,7-fachen Polleiterstrom. Die Frage ist, ob der N-Leiter somit überlastet ist. Eine Antwort gibt die Erwärmung des N-Leiters im Vergleich zur maximal zulässigen Erwärmung. Diese maximal

zulässige Erwärmung ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Leiterisolationsmaterial
- Umgebungstemperatur
- Leiteranordnung/Geometrie
- Verlegeart
- Häufung

Für den hier behandelten Querschnitt wurden zwei Kabel im Labor getestet. Die Verlegeart wurde so gewählt, dass das untersuchte Kabel die Wärme über die Luft abgeben musste (vergleichbar mit Verlegeart E gemäss NIN). Beim Test waren alle (alle fünf) Leiter mit einem Strom von 24 A durchflossen. Somit kam eine Situation zustande, die extremer ist als die realistische Worst-Case-Belastung. Messresultate bei stationärer Endtemperatur gemäss Tabelle 2.

Aus den Resultaten lässt sich eine Grafik konstruieren, welche die Kabelerwärmungen und Stromverträglichkeiten zusammenfassend darstellt (Bild 2). Ebenso kann daraus die Auswirkung der Polleiterauslastung auf die Erwärmung des Neutralleiters entnommen werden.

Da offensichtlich auch der Neutralleiterstrom – und nicht nur der Polleiterquerschnitt – die maximale Auslastung der Polleiter vorgibt, darf die Polleiterbelastung eine bestimmte Stromstärke nicht überschreiten. Bei den untersuchten 5-Leiter-Kabeln

sind die Polleiterstromstärken auf 16 A begrenzt. Die Kabel haben also eine Reserve von etwa 10 A, sodass bei realistischer Anwendung keine Überlastung geschieht. Falls ein Extremfall eintritt, bei welcher der N-Leiter seinen hier ermittelten Verträglichkeitspegel erreicht, kann die Wärme an den unbelasteten PE-Leiter und an die mindestens 20 °C kühleren Polleiter übergehen. Es wird sich somit eine tiefere Temperatur einstellen.

Bei anderen Kabeltypen, mit Strombelastbarkeiten nach NIN, müssen die Oberschwingungen im N-Leiter berücksichtigt werden (Textkasten NIN). Es ergibt sich dann eine begrenzte Auslastbarkeit der Polleiter und somit des Netzes mit Wirkleistung. Die Auslastbarkeit ist abhängig von der Anzahl nicht linearer Oberschwingungen erzeugender Verbraucher und ist am geringsten, wenn nur nicht lineare Verbraucher am Netz angeschlossen sind. Um die Belastungsgrenze des N-Leiters zu erreichen, bedarf es einer unrealistisch hohen Anzahl angeschlossener PCs, Tabelle 3 gibt Anhaltspunkte.

Erkennung/Messung

Oberschwingungen erstrecken sich bis in den kHz-Bereich und können nicht mit jedem einfachen Messinstrument erfasst werden. Das Hauptproblem liegt in der korrekten Berechnung des Effektivwertes. Messgeräte, welche auf Sinus-Effektivwerte abgestimmt sind, zeigen bei verzerrten Signalen falsche Werte an. Nur Messgeräte, die den Echtheffektivwert (TRMS) des Signals berechnen, sind für Oberschwingungsmessungen brauchbar.

Spezielle Oszilloskope können die Signalformen und Oberschwingungsspektren besonders gut veranschaulichen, sodass man daraus direkt Rückschlüsse ziehen kann.

Bei der Bestimmung des Oberschwingungsgehaltes von Neutralleitern ist zu beachten, dass die Messwerte vom Nullungssystem abhängen. In einem TN-S-System können die Neutralleiterströme nur den vorgegebenen Pfad des Neutralleiters nehmen. Hingegen teilen sich die Neutralleiterströme in einem TN-C-System entsprechend den zusätzlich zur Verfügung stehenden Erdungs- und Potenzialausgleichsstrukturen auf.

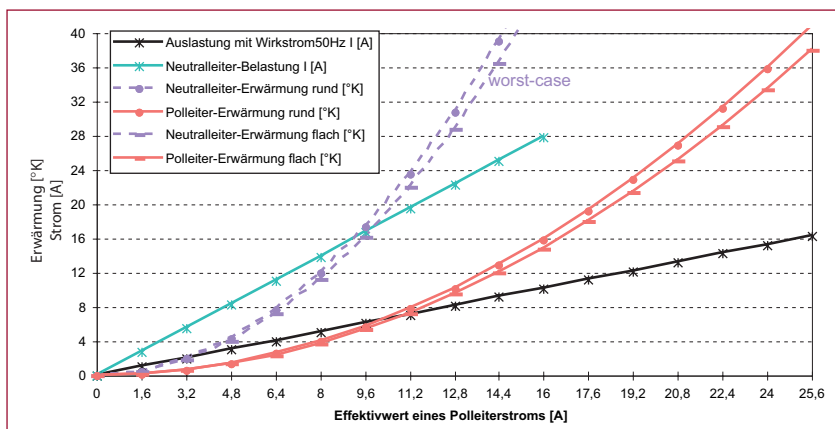


Bild 2 Kabelerwärmungen im Zusammenhang mit symmetrischen Strombelastungen bei den untersuchten 5-Leiterkabeln. Es sind auch die Polleiterauslastungen ersichtlich. Das Flachkabel erwärmt sich weniger stark, da es durch seine grössere Oberfläche mehr Wärme abstrahlen kann.

Dies hat zur Folge, dass im Neutralleiter nur ein Teil der Ströme erfasst werden kann.

Magnetfelder von 5-Leiter-Kabeln

Die Magnetfelder von Rund- und Flachkabeln unterscheiden sich aufgrund ihrer geometrischen Anordnung. Rundkabel haben geringfügig kleinere Leiterabstände als Flachkabel und sind verdreht. Die Schlaglänge ist unterschiedlich. Es gibt z.B. Typen mit 15 cm und andere mit 50 cm. Diese Eigenschaften lassen erwarten, dass Rundkabel geringere Magnetfelder haben. Simulationen können die unsichtbaren Magnetfelder visualisieren, indem die Kabelgeometrien modelliert und die gewünschten Stromstärken eingesetzt werden.

In einer Untersuchung wurden verschiedene Messungen und Simulationen an Rund- und Flachkabeln mit 2,5 mm² Querschnitt durchgeführt. Die Ergebnisse können anhand zweier Simulationsgrafiken (Bild 3) optimal zusammenfassend dargestellt werden. Im Nahbereich treten abschnittsweise ähnliche magnetische Feldstärken auf. Weiter entfernt kommt die magnetfeldreduzierende Verdrehung zum Tragen. Die resultierenden Magnetfelder sind jedoch bei beiden Kabeltypen verhältnismässig gering. In dieser Größenordnung und Anwendung spielen tieffrequente Magnetfelder eine eher untergeordnete Rolle.

Beeinflussungen/Störkopplungen zwischen Kabeln

Die kombinierte Verlegung von niederspannungs- und informationstechnischen Leitungen bedingt die Berücksichtigung und Kenntnis von möglichen Störbeeinflussungen. Die vom NS-Kabel ausgehende Störwirkung muss in Abhängigkeit von der Frequenz betrachtet werden. Grundsätzlich können zwei stark verbreitete Frequenzbereiche unterschieden werden: NF (50-Hz-Netzfrequenz und ihre Oberschwingungen) und HF (MHz-Bereich). Im NF-Bereich dominiert die induktive Kopplung. Im HF-Bereich dagegen sind die Verhältnisse komplizierter. Bei niederimpedanten Störquellen sind Ströme im Vordergrund, welche sowohl Gleichtakt- wie auch Gegentaktstörungen bewirken können. Schleifengebilde sind speziell betroffen von Gleichtaktstörungen. Bei hochimpedanten Stör-

quellen sind Spannungen im Vordergrund, die besonders Gleichtaktstörungen hervorrufen.

Gegenmassnahmen müssen auf die möglichen Kopplungen ausgerichtet sein. Zentrale Massnahmen sind die Verdrillung und Schirmung der Senken-Leiter. Die Anwendung beider Massnahmen ist selbstverständlich am effizientesten. Hier ist zu beachten, dass die Verdrillung immer relativ ist. Auf den Unterschied kommt es an.

Dass es auch genügen kann, nur eine dieser Massnahmen einzusetzen, um Gegentaktstörsignale wirkungsvoll fernzuhalten, beweisen zwei Beispiele aus der Praxis:

- Bei Ethernet-Kabeln mit Nutzfrequenzen bis etwa 100 MHz kommt meist allein die Verdrillung zum Zug. Einkoppelte Störanteile kompensieren sich aufgrund der systematischen Polaritätswechsel.
- Bei kombinierten Flachkabeln (NS und Bus) kommt allein die Schirmung zum Zug. Ein spezieller mehrlagiger Schirm vermindert wirksam die Störeinkopplung durch die parallel geführten NS-Leiter.

Die Beherrschung von Gleichtaktstörungen gestaltet sich aufwändiger. Hier sind die Engeräte und ihre Masseanbindungen einzubeziehen. Meist sind längere Leitungen betroffen, die auf geeignete Art und Weise in ein Potenzialausgleichsnetz einzubinden sind. Ein konzeptionelles Vorgehen ist unabdingbar. Die Massnahmen sind entsprechend umfangreich. Das folgende Kapitel geht näher auf einige Punkte ein.

Installationsgrundsätze und Empfehlungen

Stark- aber auch Schwachstrominstallationen sind grundsätzlich in Baumstruktur zu erstellen. Es ist zu vermeiden, dass zwischen den Ästen und anderen Enden Verbindungen gemacht werden (keine Schleifenflächen).

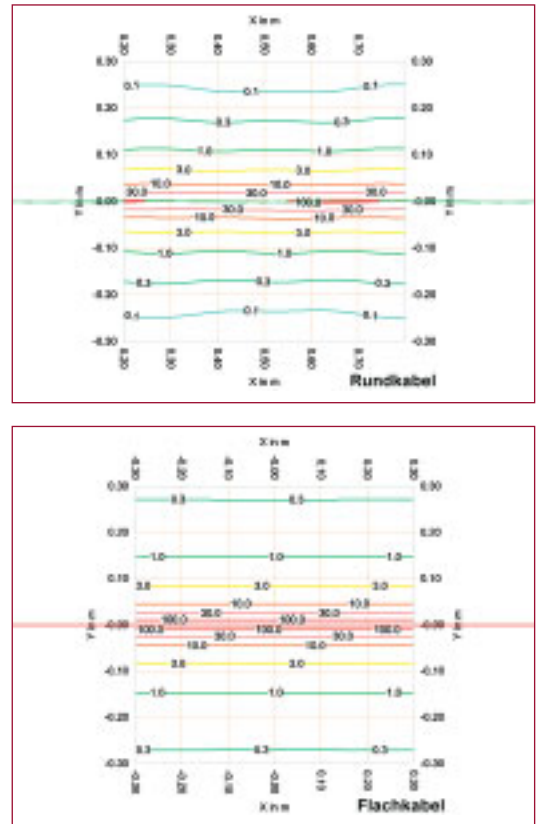


Bild 3 Kabelmodelle
Berechnungen der magnetischen Flussdichteverteilungen für beide untersuchten Kabel.

Berechnungsebene: 1 cm über dem nächstgelegenen Leiter, Polleiterstromstärke: 16 A, Ströme dreiphasig und symmetrisch, Neutralleiterstrom: 0 A, Rundkabel-Verdrillungsschlaglänge: 50 cm. Isolinien-Werte in µT.

Bei der Verlegung von Niederspannungs- und metallenen Datenkabeln, welche dasselbe Kabelführungssystem (Trassen horizontal und vertikal, Brüstungskanäle usw.) benutzen, sind sie gemäss den Vorgaben der Norm EN 50174-2 (Informationstechnik: Installation von Kommunikationsverkabelung; Installationsplanung und Installationspraktiken in Gebäuden) zu installieren. Wesentliche Grundsätze sind in dieser seit August 2000 geltenden Norm spezifiziert. Es sind dies zum Beispiel Angaben zu:

- Verwenden von Metallkanälen; geeignet sind gelochte und als bevorzugt gelten ungelochte Kabelwannen
- Trennen von Kreisen innerhalb Trassen oder Verwenden von separierten Trassen

Stromwertevergleich	I (L)	I (N)
18 PCs ohne PFC (hohe OS)	4,5 A	8 A
36 PCs "	9 A	16 A
45 PCs "	16 A	28 A
Absicherung	16 A	-
Belastungsgrenze aus den Labormessungen (5 belastete Leiter)	Rundkabel: 25,4 A Flachkabel: 26,3 A	

Tabelle 3 Erreichen der Belastungsgrenze des N-Leiters mit einer unrealistisch hohen Anzahl angeschlossener PCs

- Distanzieren bei parallel verlegten Niederspannungskabeln mit geschirmten oder ungeschirmten Kabeln
- Mitführen von separatem Erdleiter bei nicht metallenen Trassen
- Potenzialausgleich.

Kreuzen Niederspannungskabel (flache oder runde) Datenkabel, so hat das Kreuzen im rechten Winkel zu erfolgen. Kabel für verschiedene Zwecke (Stark- und Schwachstrom) sind nicht an den gleichen Stellen zu kreuzen.

Bei der Verwendung eines Rund- oder Flachkabelsystems mit Adaptern sind nur die dazu konzipierten Anschlüsselemente zu verwenden.

In einem (noch) sauberen Netz ist es sinnvoll, Präventivmassnahmen zu treffen, um von den Oberschwingungen und deren Auswirkungen nicht überrascht zu werden. Einerseits sind zukünftige Ausbauten zu berücksichtigen und andererseits ist es zweckmässig, geeignete Geräte zur Überwachung zu installieren.

Bei der Beschaffung neuer Geräte sollte vor allem die Qualität und nicht nur der günstige Preis ausschlaggebend sein. Eine Abklärung der Netzurückwirkungen ist in jedem Fall ratsam. Verschiedene Hersteller nehmen die Oberschwingungsprobleme ernst und rüsten ihre Geräte mit so genannten PFC-Modulen (Power Factor Correction) aus.

5-Leiter-Installationskabel kommen als Gruppenleitungen in Hohldecken, Doppelböden usw. zum Einsatz. Störbeeinflussungen durch niederfrequente Magnetfelder haben hier eine geringe Bedeutung. Für die Überkopplung von hochfrequenten Störungen ist der Kabeltyp (rund oder flach) nicht massgebend. Umso relevanter sind die Massnahmen bei den Senkekabeln (z.B. Informationskabel).

In Bezug auf den betrachteten Kabelquerschnitt von 2,5 mm² sind die vorgeschriebenen Absicherungen (16 A) tief genug, um selbst bei hohen Oberschwingungsanteilen der angeschlossenen Verbraucher eine Überlastung zu verhindern. ET04

Martin Arnold und Henrik Lowack
 Arnold Engineering und Beratung
 EMP- und EMV-Schutztechnik
 Wallisellerstr. 75
 8152 Opfikon
 www.arnoldeub.ch

Wie darf gemäss NIN 2005 ein Neutralleiter belastet werden?

Die zunehmende Gerätedichte (Computer, Drucker usw.) hat zur Folge, dass sich bei 5-Leitersystemen die Belastung der Netze durch Oberwellen zuungunsten des Neutralleiters auswirkt. Dazu wird in der neu erschienen NIN 2005 in 5.2.3.4, .1–.3 festgelegt:

- Bei der Ermittlung der Anzahl der belasteten Leiter in einem Stromkreis sind nur jene Leiter zu berücksichtigen, die den Belastungsstrom führen. Wenn in einem Stromkreis eine symmetrische Belastung aller Polleiter angenommen werden kann, ist der zugehörige Neutralleiter nicht zu berücksichtigen.
- Wenn der Neutralleiter belastet wird, ohne dass die Polleiter entsprechend entlastet werden, muss der Neutralleiter bei Festlegung der Strombelastbarkeit des Stromkreises mitberücksichtigt werden. Solche Ströme können beispielweise durch einen ausgeprägten Oberschwingungsstrom in Drehstromkreisen verursacht werden.
- Wenn der Oberschwingungsanteil grösser ist als 10%, muss der Neutralleiter den-selben Querschnitt aufweisen wie der Polleiter.
- Leiter, die nur Schutzleiterfunktionen haben, werden nicht berücksichtigt. PEN-Leiter müssen in der gleichen Weise wie Neutralleiter behandelt werden.

In den Beilagen und Erläuterungen (B + E) wird zu 5.2.3.4.2 (Auswirkungen von Oberschwingungsströmen auf symmetrisch belastete Drehstromsysteme) umfassend dargelegt.

Auszug aus NIN 5.2.3.4.2 (B + E):

Werden die in der Tabelle (siehe nachstehend) aufgeführten Reduktionsfaktoren auf die Strombelastbarkeit eines Kabels oder einer Leitung mit drei belasteten Leitern angewendet, so ergibt sich die Strombelastbarkeit eines Kabels oder einer Leitung mit vier belasteten Leitern, wobei der Strom im vierten Leiter durch Oberschwingungsanteile entsteht. Die Erwärmung der Polleiter durch den Oberschwingungsstrom ist in den Reduktionsfaktoren berücksichtigt.

Wird im Neutralleiter eine höhere Stromstärke als im Polleiter erwartet, ist der Nennquerschnitt des Kabels oder der Leitung auf Basis des Neutralleiterstromes zu bestimmen.

Basiert die Auswahl des Kabels oder der Leitung auf einem Neutralleiterstrom, der den Polleiterstrom nicht wesentlich übersteigt, ist es ebenso erforderlich, den für drei belastete Leiter angegebenen Tabellenwert der Strombelastbarkeit zu reduzieren.

Beträgt der Neutralleiterstrom mehr als 135% des Polleiterstromes und wurde das Kabel oder die Leitung auf der Basis des Neutralleiters ausgewählt, werden die drei Polleiter nicht voll belastet. Die Verringerung der Erwärmung durch die Polleiter gleicht die Erwärmung durch den Neutralleiter so weit aus, dass es nicht erforderlich ist, den Wert der Strombelastbarkeit für drei belastete Leiter mit einem Reduktionsfaktor zu verringern.

Dritte Oberschwingung Anteil am Polleiterstrom (%)	Reduktionsfaktor	
	Auswahl des Querschnittes nach dem Polleiterstrom	Auswahl des Querschnittes nach dem Neutralleiterstrom
0–15	1,0	–
15–33	0,86	–
33–45	–	0,86
> 45	–	1,0

Tabelle 5.2.3.4.2.1 Reduktionsfaktoren für Oberschwingungsströme in 4- und 5-adrigen Kabeln. In den B+E werden Berechnungsbeispiele aufgeführt.

Martin Arnold, ist Gründer und Inhaber der ARNOLD Engineering und Beratung, Opfikon. Er befasst sich mit der Beratung, Prüfung und Optimierung in sämtlichen EMV-Belangen des installationstechnischen Bereiches.

Henrik Lowack, dipl. El. Ing. ETH, ist Mitarbeiter bei ARNOLD Engineering und Beratung. Er befasst sich mit der EMV und den damit zusammenhängenden Problemen in messtechnischen Belangen, wie sie bei elektrischen Installationen und Anlagen anzutreffen sind.

Hinweis:

Mit Woertz-Know-how hat die Firma Woertz AG, als Spezialist für elektrotechnische Artikel und Installationssysteme, im

vergangenen Frühling an vier verschiedenen Orten ein Seminar mit dem Thema «Mit Flachkabeln läuft rund» durchgeführt. Fachleute der Firmen ARNOLD Engineering und Beratung, Weitnauer Messtechnik und Woertz AG haben in drei Fachreferaten über Facts, Anforderungen an Installationen und über Zusammenhänge informiert.

Für Leser der ET, welche nicht an den Veranstaltungen teilnehmen konnten, und aufgrund der vielen positiven Reaktionen wird die Thematik in dieser und zwei folgenden Elektrotechnik-Ausgaben publiziert.