

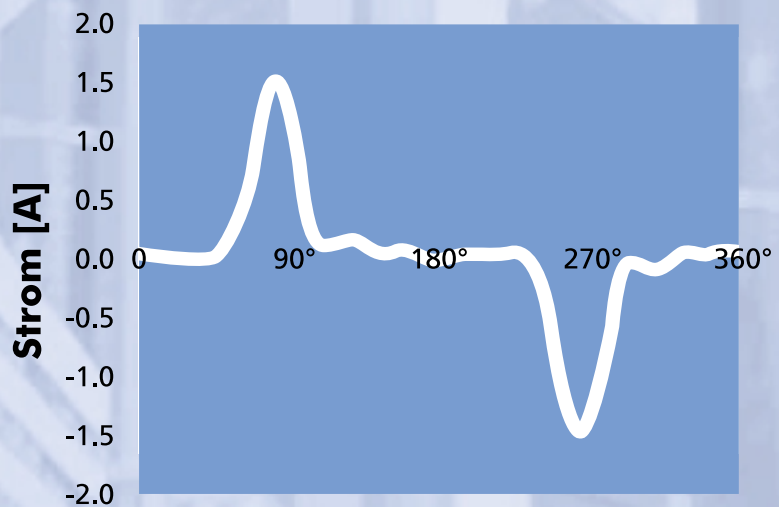
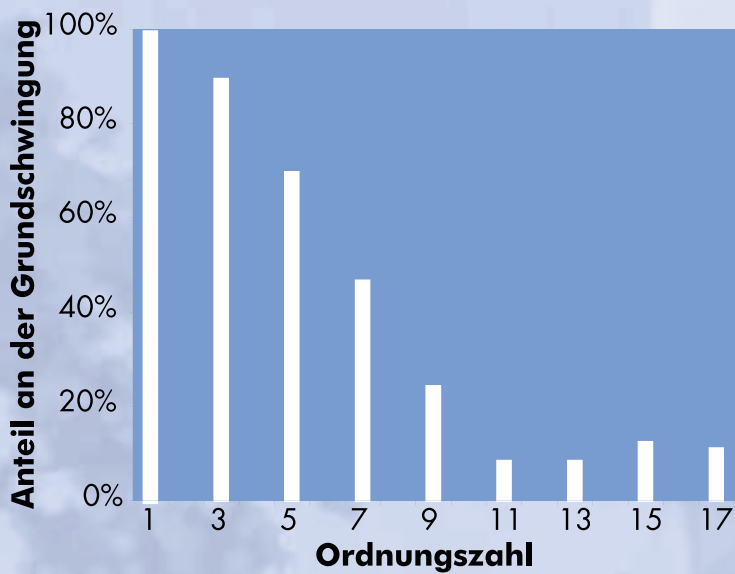
# Leitfaden Netzqualität



Leonardo da Vinci

## Oberschwingungen Ursachen und Auswirkungen

3.1



Oberschwingungen

# Oberschwingungen

## Ursachen und Auswirkungen

David Chapman  
CDA UK  
November 2001

Übersetzung: Deutsches Kupferinstitut, Mai 2002

### Europäisches Kupferinstitut (ECI)

Das Europäische Kupferinstitut wird getragen von Mitgliedswerken der ICA (International Copper Association) und dem IWCC (International Wrought Copper Council, einem Zusammenschluss der Halbzeugwerke). Auf Basis dieser Mitgliedschaft handelt das ECI im Interesse der weltgrößten Kupfer-Erzeuger und der führenden europäischen Halbzeugwerke für den Einsatz von Kupfer. Seit seiner Gründung im Januar 1996 bündelt es die Aktivitäten eines Netzwerks aus 10 nationalen Kupferzentren in Benelux, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Polen, Skandinavien, Spanien und Ungarn und setzt die Aktivitäten fort, die 1959 von der Copper Products Development Association und 1961 von der INCRA (International Copper Research Association) begonnen wurden.

### Deutsches Kupferinstitut (DKI)

Das Deutsche Kupferinstitut wurde 1927 als zentrale technisch-wissenschaftliche Auskunfts- und Beratungsstelle für Kupfer und Kupferlegierungen in Deutschland gegründet. Gegenstand und Anliegen seiner Beratungstätigkeit ist die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Hier geht es um die Erhaltung herkömmlicher und um die Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

Das Deutsche Kupferinstitut sammelt und verbreitet zu diesem Zweck alle zugänglichen Informationen aus Wissenschaft, Technologie und Praxis. Sein Ziel ist es, die dort gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen einem breiten Publikum bekannt zu machen und zu erläutern und somit den allgemeinen Wissensstand und die Wertschätzung von Kupfer und Kupferlegierungen zu fördern und zu festigen.

Das Deutsche Kupferinstitut ist seit 1995 auch im Internet unter [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) und bei direkten Fragen per E-mail unter [info@kupferinstitut.de](mailto:info@kupferinstitut.de) zu erreichen. So können Informationen und Daten zum Werkstoff Kupfer und seinen Legierungen rund um die Uhr direkt abgefragt werden.

### Danksagung

Diese Schrift wurde im Rahmen der Leonardo Power Quality Initiative (LPQI) erstellt, eines europäischen Ausbildungs- und Übungsprogramms unter der Schirmherrschaft und mit Unterstützung des Leonardo da Vinci Programms der Europäischen Union und der ICA International Copper Association.

Weitere Informationen finden Sie unter: [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org).

### Haftungsausschluss

Der Inhalt dieses Projektes gibt nicht notwendigerweise die Meinung der Europäischen Union wieder, noch zeichnet diese in irgendeiner Weise hierfür verantwortlich.

ECI und DKI übernehmen keine Verantwortung für irgendwelche direkte oder indirekte Folge- oder Zufallsschäden, die aus dem sachgemäßen oder unsachgemäßen Gebrauch der in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen und Daten entstehen.

Copyright© European Copper Institute und Deutsches Kupferinstitut.

Ungekürzte Reproduktion bei korrekter Angabe der Quelle erlaubt.



Deutsches Kupferinstitut  
Am Bonnhof 5  
D-40474 Düsseldorf

Tel.: +49 211 4796300  
Fax: +49 211 4796310  
E-Mail: [info@kupferinstitut.de](mailto:info@kupferinstitut.de)  
Internet: [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de)



European Copper Institute  
Tervurenlaan 168 / b 10  
B-1150 Brussel

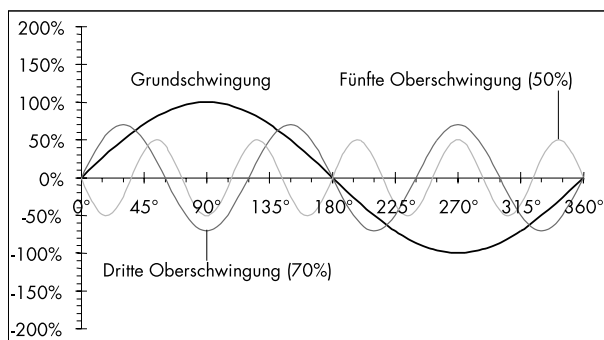
Tel.: +32 2 7777070  
Fax: +32 2 7777079  
E-Mail: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Internet: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)

# Oberschwingungen

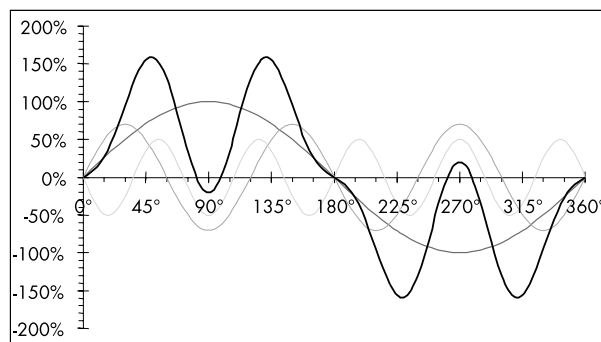
## Ursachen und Auswirkungen

Dieser Band der Einführung behandelt die Ursachen von Oberschwingungsströmen und deren Auswirkungen in elektrischen Anlagen. Die entsprechenden Gegenmaßnahmen werden weiter unten im Abschnitt „Maßnahmen zur Begrenzung von Oberschwingungen“ vorgestellt.

Oberschwingungsfrequenzen sind ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung, das heißt, die Oberschwingung dritter Ordnung für eine Grundschwingung von 50 Hz wäre 150 Hz, die Oberschwingung fünfter Ordnung wäre 250 Hz. Bild 1 zeigt eine Grundschwingung mit Oberschwingungen dritter und fünfter Ordnung.



*Bild 1: Grundschwingung mit Oberschwingungen dritter und fünfter Ordnung*



*Bild 2: Verzerrte Stromschwingung*

Bild 2 zeigt eine Grundschwingung, zu der 70 % der Oberschwingung dritter Ordnung und 50 % der Oberschwingung fünfter Ordnung addiert wurden. Dabei ist zu beachten, dass die meisten verzerrten Oberschwingungsströme in der Praxis viel komplexer sind als dieses Beispiel, da sie eine viel größere Zahl von Oberschwingungen, u. U. mit unterschiedlichen Phasenlagen, beinhalten.

Bei dieser Schwingung handelt es sich eindeutig nicht um eine Sinusschwingung. Daher zeigen normale Messmittel, wie etwa auf Effektivwert geeichte Mittelwert-Messgeräte, ungenaue Messwerte an. Außerdem ist zu beachten, dass es je Periode sechs statt zwei Nulldurchgänge gibt, so dass alle Betriebsmittel, die sich an den Nulldurchgängen orientieren, schlecht oder gar nicht funktionieren. Die Schwingung enthält außer der Grundschwingung weitere Frequenzen und muss entsprechend behandelt werden.

Wenn es um Oberschwingungen in Energieverteilungsanlagen geht, bereiten die Oberschwingungsströme die größten Probleme, denn die Oberschwingungen entstehen als Ströme, und die meisten Schadeffekte sind auf diese Ströme zurückzuführen. Ohne Kenntnis des Spektrums der Oberschwingungsströme lassen sich keine brauchbaren Schlüsse ziehen, aber es ist immer noch gängige Praxis, nur den Wert des Gesamtverzerrungsgehaltes anzugeben. Wenn sich Oberschwingungen in einem Verteilungsnetz ausbreiten, das heißt, in Teilstromkreisen, die nichts mit der Fortleitung des Oberschwingungsstromes zu tun haben, so tun sie dies als Spannung. Es ist sehr wichtig, die Werte sowohl der Spannung als auch des Stromes zu messen und die angegebenen Werte explizit als Spannung und Strom auszuweisen. Es ist üblich, Messwerte der Stromverzerrung mit dem Suffix „I“ zu kennzeichnen, zum Beispiel 35 % THDI, und Spannungsverzerrungen mit „U“, zum Beispiel 4 % THDU.

Oberschwingungsströme treten in der Elektrizitätsversorgung seit vielen Jahren auf. Anfänglich wurden sie von Quecksilberdampfgleichrichtern verursacht, die zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom für Elektroloks und für drehzahlverstellbare Gleichstrommotoren in der Industrie eingesetzt wurden. Erst in den letzten Jahren ist die Typenvielfalt und die Anzahl von Betriebsmitteln, die Oberschwingungen erzeugen, stark angestiegen und wird weiter steigen, so dass Entwickler und Hersteller heute Oberschwingungen und ihre Nebeneffekte sehr sorgfältig mitbedenken müssen.

Dieser Abschnitt beschreibt, wie und warum Oberschwingungen erzeugt werden, wie sich ihr Auftreten auf das Netz und die Betriebsmittel auswirkt, und wie diese Effekte auf ein Mindestmaß begrenzt werden können.

## Typen von Betriebsmitteln, die Oberschwingungen erzeugen

Einphasige Lasten, zum Beispiel:

- Schaltnetzteile
- elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen
- kleine unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen (USV-Anlagen)

Dreiphasige Lasten, zum Beispiel:

- drehzahlverstellbare Motoren
- große USV-Anlagen

## Einphasige Lasten

### Schaltnetzteile

In den meisten modernen Elektrogeräten kommen Schaltnetzteile (SNT) zum Einsatz. Diese unterscheiden sich dadurch von älteren Geräten, dass der eingehende Wechselstrom zunächst über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und mittels eines Glättungskondensators ausgeglättet wird. Erst danach erfolgt die Transformierung durch Wechselrichter auf eine sehr viel höhere Frequenz. Der Vorteil – für den Hersteller der Anlage – besteht darin, dass Größe, Kosten und Gewicht erheblich reduziert werden und das Netzteil in beinahe jedem gewünschten Format hergestellt werden kann. Der Nachteil – für alle anderen – besteht darin, dass das Netzteil – statt eines kontinuierlichen Stroms – Strom-Impulse aufnimmt, die große Anteile von Oberschwingungen dritter und höherer Ordnung und signifikante Hochfrequenz-Komponenten enthalten (siehe Bild 3). An der Einspeisung wird ein einfacher Filter eingesetzt, um die Hochfrequenz-Komponenten aus Außen- und Neutraleiter zur Erde abzuleiten, aber dies hat keine Auswirkung auf die Oberschwingungsströme, die ins Netz zurück fließen. Die durch diese Filter verursachten Leckströme oder Ableitströme werden in Band 6 behandelt.

Einphasige USV-Einheiten zeigen Eigenschaften, die denen von SNT sehr ähnlich sind.

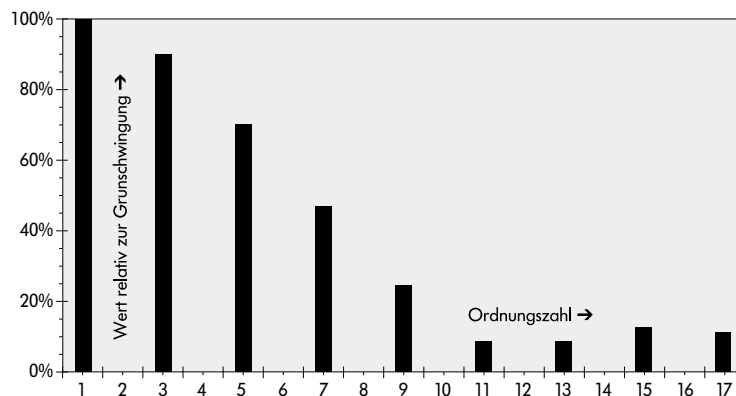


Bild 3: Oberschwingungsspektrum eines typischen PC-Eingangstroms

Bei höheren Leistungen ist in letzter Zeit ein Trend zur so genannten Leistungsfaktor-Korrektur zu beobachten. Das Ziel ist, die Last der Stromquelle wie eine ohmsche Last aussehen zu lassen, so dass der eingespeiste Strom sinusförmig und in Phase mit der angelegten Spannung erscheint. Dies wird erreicht, indem der Eingangstrom als hochfrequente dreieckförmige Schwingung aufgenommen wird, die durch den Filter zu einer Sinusform ausgeglättet wird. Diese besonders hoch entwickelte Lösung lässt sich noch nicht ohne Weiteres auf die billigen Einheiten übertragen, die den Großteil aller Lasten in gewerblichen und industriellen Anlagen ausmachen. Es muss sich noch zeigen, welche Probleme der Einsatz dieser Technik im großen Maßstab mit sich bringen kann!

### Elektronische Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen

Nachdem in den letzten Jahren der Ruf nach besseren Wirkungsgraden lauter wurde, sind elektronische Vorschaltgeräte (EVG) immer beliebter geworden. Insgesamt betrachtet sind sie nur wenig effizienter als die besten induktiven Vorschaltgeräte, und tatsächlich ist der größte Teil des Gewinns eher dem Umstand zuzuschreiben, dass die Lampe selbst effizienter arbeitet, wenn sie mit hoher Frequenz betrieben wird, als dem

# Ursachen und Auswirkungen

EVG. Deren Hauptvorteil besteht darin, dass die Helligkeit durch eine Regelung des Lampenstromes über eine hierdurch verlängerte Lebensdauer aufrecht erhalten werden kann – eine Methode, die den Wirkungsgrad über die Gesamtlebensdauer eher reduziert. Ihr großer Nachteil sind die Oberschwingungen, die sie im Netz erzeugen. Für höhere Nennwerte sind Leistungsfaktorkorrigierte Typen erhältlich, die die Oberschwingungsprobleme verringern, allerdings zu erheblichen Kosten. Außerdem werden gleichzeitig Fälle bekannt, in denen durch die zwangsläufig dem Eingangsstrom überlagerte Hochfrequenz Störausstrahlungen entstehen. Mag ein einzeln im Labor geprüfetes Exemplar auch alle EMV-Normen erfüllen, so addieren sich diese Störungen doch zum Teil auf, wenn Hunderte oder gar Tausende solcher Geräte in einer Anlage zum Einsatz kommen. Umgekehrt neigen EVG in bestimmten Betriebsumgebungen – und man hat noch nicht herausgefunden, wodurch sich diese auszeichnen – zu massenweisen Ausfällen. Dies ist der Anfang oben genannter Probleme mit der elektronischen Leistungsfaktor-Korrektur.

Im Bereich über 25 W Lampenleistung ist eine solche Leistungsfaktor-Korrektur jedoch seit längerem schon vorgeschrieben, weil die Oberschwingungsbelastung sonst nicht mehr zu ertragen wäre, bzw. die Grenzwerte sind derart gelegt worden, dass die Korrektur eingebaut werden muss. Kleinere Einheiten sind jedoch gewöhnlich nicht korrigiert.

Kompaktsparlampen werden heute zunehmend an Stelle von Glühlampen eingesetzt. Ein Mini-EVG im Sockel der Lampe steuert eine gebogene Leuchtstoffröhre von 8 mm Durchmesser. Für 11 Watt ausgelegte Kompaktsparlampen werden als Ersatz für 60-Watt-Glühlampen verkauft und haben eine Lebensdauer von 8000 Stunden. Eine elektronische Leistungsfaktor-Korrektur wird allerdings wie bei den kleineren separaten EVG nicht eingebaut. Die beschriebenen Probleme mit genannten Häufungen von Ausfällen sind jedoch von Kompaktsparlampen nicht bekannt, woraus geschlossen werden kann, dass die Empfindlichkeit mit Einbau der Leistungsfaktor-Korrektur erst einsetzt.

Das Spektrum des Oberschwingungsstroms ist dem entsprechend reichhaltig (Bild 4). Diese Lampen werden weithin als Ersatz für Glühlampen in Privathaushalten und besonders in Hotels eingesetzt, wo ernst zu nehmende Probleme durch Oberschwingungen plötzlich alltäglich werden.

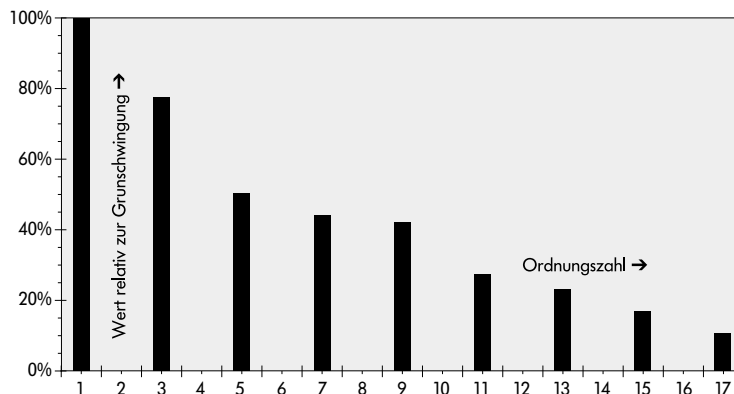


Bild 4: Oberschwingungsspektrum einer typischen Kompaktsparlampe

## Dreiphasige Lasten

Drehzahlveränderliche Antriebe, USV-Anlagen und Gleichrichter im Allgemeinen beruhen auf der dreiphasigen Brückenschaltung, die auch als sechspulsige Brücke bekannt ist, da im resultierenden Gleichstrom sechs Impulse pro Schwingung (einer je Halbschwingung und Phase) auftreten.

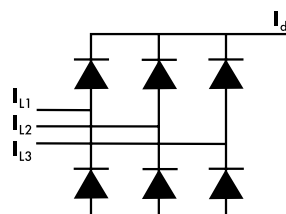


Bild 5: Dreiphasige oder sechspulsige Brücke

Die sechspulsige Brücke produziert Oberschwingungen bei  $6n \pm 1$ , das heißt, eins mehr und eins weniger als jedes Vielfache von sechs. In der Theorie ist die Höhe jeder Oberschwingung gleich dem Kehrwert der Oberschwingungszahl, so dass sich 20 % Oberschwingungen fünfter Ordnung und 9 % elfter Ordnung etc. ergeben. Ein typisches Spektrum zeigt Bild 6.

# Ursachen und Auswirkungen

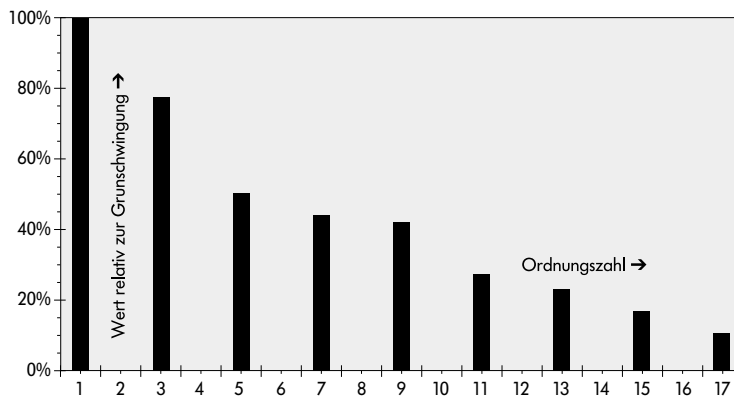


Bild 6: Oberschwingungsspektrum einer typischen sechspulsigen Brücke

Das Ausmaß der Oberschwingungen wird durch den Einsatz einer zwölfpulsigen Brücke signifikant reduziert. Genau genommen handelt es sich um zwei sechspulsige Brücken, die von einer im Stern und einer im Dreieck verschalteten Wicklung gespeist werden, wodurch zwischen beiden eine Phasenverschiebung von  $30^\circ$  erreicht wird.

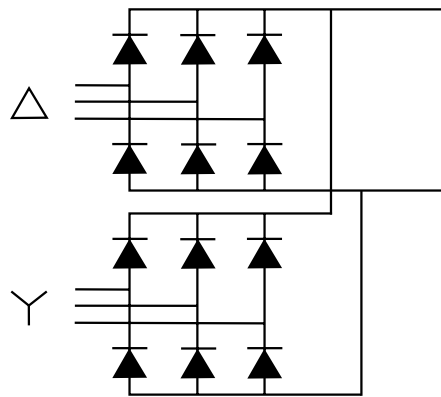


Bild 7: Zwölfpulsige Brücke

Die  $6n$ -Oberschwingungen werden theoretisch beseitigt, aber in der Praxis hängt der Umfang der Reduktion von der Abstimmung der Umrichter ab und liegt typischerweise bei einem Faktor von 20 bis 50. Die  $12n$ -Oberschwingungen bleiben unverändert. Es wird nicht nur der Oberschwingungsstrom insgesamt gesenkt, sondern die noch verbleibenden Oberschwingungen sind von höherer Ordnung, wodurch sich die Auslegung des Filters erheblich einfacher gestaltet.

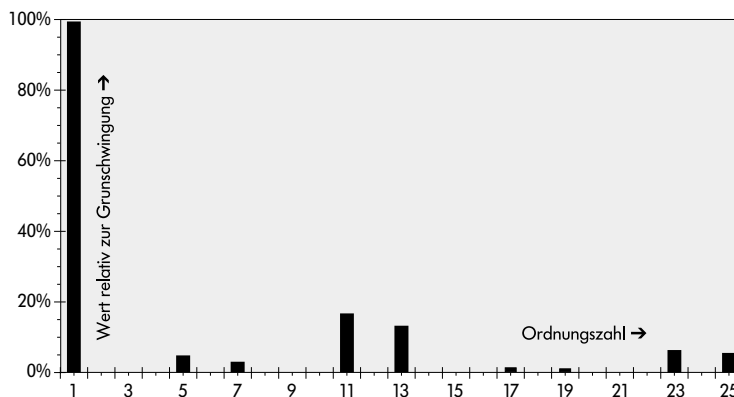


Bild 8: Oberschwingungsspektrum einer typischen zwölfpulsigen Brücke

Die Hersteller der Betriebsmittel haben oft bereits Schritte unternommen, um den Umfang der Oberschwingungsströme zu reduzieren, vielleicht durch den Einbau eines Filters oder einer Reihen-Induktivität. So werden bei neueren PCs und Umrichter-gesteuerten Waschmaschinen z. B. die – allerdings in diesem Punkt sehr laschen – Anforderungen der neuen EN 61000-3-2 erfüllt.

# Ursachen und Auswirkungen

Eine weitere Erhöhung der Impulszahl auf 24, die durch den Einsatz von zwei parallelen zwölfpulsigen Einheiten mit einer Phasenverschiebung von 15 Grad erreicht wird, reduziert den Gesamtoberschwingungsstrom auf ungefähr 4,5 %. Die höhere Komplexität erhöht natürlich die Kosten, so dass diese Art von Steuerungen nur zum Einsatz kommt, wenn absolut notwendig, um Grenzwerte des Elektrizitätsversorgers einzuhalten.

## Theoretischer Hintergrund: Wie entstehen Oberschwingungen?

In einem idealen, sauberen Netz haben die Schwingungen von Strom und Spannung eine reine Sinusform. In der Praxis entstehen nicht sinusförmige Ströme, wenn der in der Last fließende Strom der angelegten Spannung nicht proportional ist. In einem einfachen Stromkreis, der nur lineare Elemente enthält – Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten –, ist der fließende Strom proportional zur angelegten Spannung (bei einer bestimmten Frequenz), und zwar nicht nur dem Effektivwert, sondern auch jedem Augenblickswert nach. So fließt, wenn eine sinusförmige Spannung angelegt wird, auch ein sinusförmiger Strom, wie in Bild 9 dargestellt. Die Lastkennlinie gibt das Verhältnis zwischen der angelegten Spannung und dem in der Last daraus resultierenden Strom wieder; die in Bild 9 dargestellte Lastkennlinie entspricht einer linearen Last. Es ist zu beachten, dass dort, wo sich ein reaktives Element befindet, zwischen den Sinusschwingungen der Spannung und des Stromes eine Phasenverschiebung entsteht, jedoch keine Veränderung der Kurvenform. Der Leistungsfaktor geht zurück, aber der Stromkreis ist trotzdem noch linear.

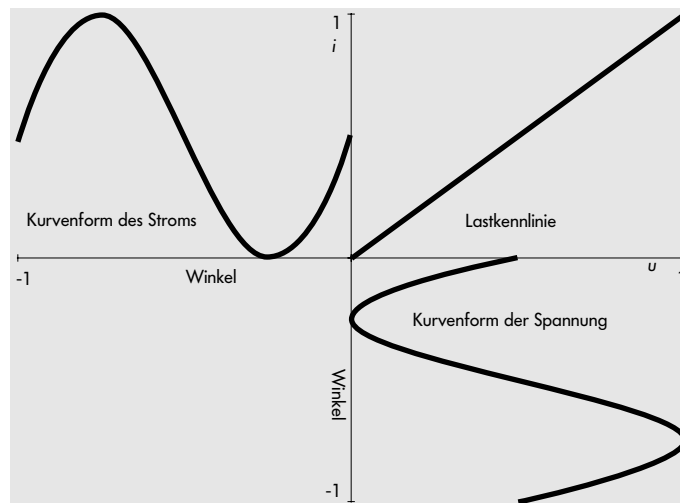


Bild 9: Stromschwingung in einer linearen Last

Bild 10 zeigt die Situation, wenn die Last ein einfacher Zweiweg-Gleichrichter mit Glättungskondensator ist, wie in der Eingangsstufe eines typischen SNT. In diesem Fall fließt nur dann Strom, wenn die Eingangsspannung der Stromversorgung die im Glättungskondensator gespeicherte Spannung übersteigt, das heißt nahe des Scheitelpunktes der Spannungssinusschwingung, wie die Form der Lastkennlinie wiedergibt.

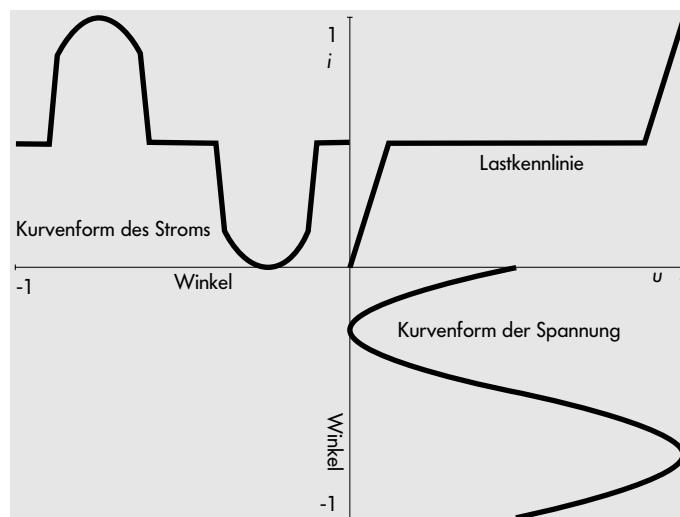


Bild 10: Stromschwingung in einer nicht linearen Last

# Ursachen und Auswirkungen

In der Praxis ist die Lastkennlinie (und folglich die Stromsinusschwingung) aller Wahrscheinlichkeit nach viel komplexer als in diesem Beispiel. Asymmetrien und Hysterese können auftreten, und die Wendepunkte und Anstiegsflanken ändern sich je nach Ladezustand.

Jede periodische Schwingung kann in eine Sinusschwingung der Grundfrequenz und eine Anzahl von Sinusschwingungen der Oberschwingungsfrequenzen zerlegt werden. Daher kann die verzerrte Stromschwingung in Bild 10 durch die Grundschiwingung dargestellt werden plus einem Prozentsatz der Oberschwingung zweiter Ordnung plus einem Prozentsatz der Oberschwingung dritter Ordnung und so weiter, möglicherweise bis zur dreizehnten Ordnung oder weiter. Bei symmetrischen Schwingungen, das heißt bei Schwingungen mit gleicher Form und Größe der positiven und negativen Halbschwingungen, ergeben sich alle geradzahligten Oberschwingungen zu null. Geradzahligte Oberschwingungen sind heutzutage relativ selten, waren jedoch verbreitet, als häufig Einweggleichrichtung eingesetzt wurde.

Bild 11 zeigt ein Ersatzschaltbild einer nicht linearen Last. Sie kann als lineare Last in Parallelschaltung mit einer Anzahl von Stromquellen dargestellt werden, wobei jede Quelle eine Oberschwingungsfrequenz erzeugt.

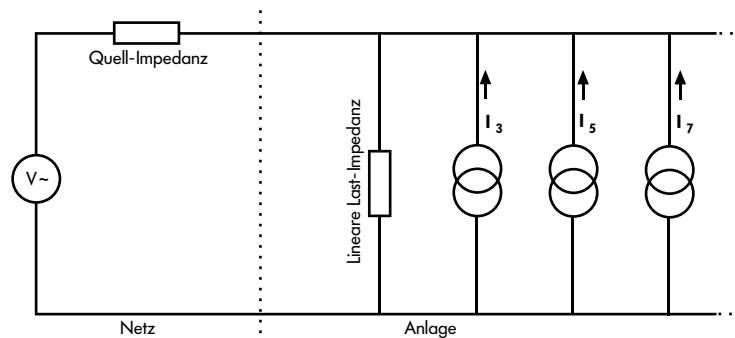


Bild 11: Ersatzschaltbild einer nicht linearen Last

Die Oberschwingungsströme, die durch die Last erzeugt werden – oder genauer, die durch die Last aus der Grundschiwingung in Oberschwingungsströme umgewandelt werden –, müssen über die Quell-Impedanz und alle anderen parallelen Pfade durch den Stromkreis fließen. Daraus ergibt sich, dass an der Impedanz der Stromversorgung Oberschwingungsspannungen auftreten und sich über das gesamte Netz verbreiten. Oberschwingungs-Erzeuger werden manchmal als Spannungsquellen dargestellt. Wenn es tatsächlich so wäre, hätte die Quell-Impedanz keinen Einfluss auf die Höhe der Oberschwingungsspannung an der Einspeisung. Tatsächlich ist die Höhe dieser Spannung proportional (über einen begrenzten Bereich) zur Quell-Impedanz und zeigt dadurch, dass der Erzeuger sich wie eine Stromquelle verhält.

Quell-Impedanzen sind sehr niedrig, so dass die von einem Oberschwingungsstrom verursachte Oberschwingungsspannung ebenfalls niedrig ist und häufig kaum über dem Hintergrundrauschen im Netz liegt. Dies kann irreführend sein, da es den Eindruck vermittelt, es bestünde kein Oberschwingungsproblem, während in der Tat große Oberschwingungsströme vorhanden sind. Das Problem ähnelt dem Versuch, einen Erdstrom mit einem Voltmeter aufzuspüren. Wann immer Oberschwingungen vermutet werden, oder wenn ihre Abwesenheit nachgewiesen werden soll, muss der Strom gemessen werden.

## Durch Oberschwingungen verursachte Probleme innerhalb der Anlage

Oberschwingungsströme verursachen sowohl im Versorgungsnetz als auch innerhalb der Anlage Probleme. Die Auswirkungen und ihre Lösungen sind sehr unterschiedlich und müssen getrennt betrachtet werden. Die geeigneten Maßnahmen, um die Auswirkungen von Oberschwingungen innerhalb der Anlage zu beherrschen, müssen nicht unbedingt auch die im Netz verursachten Verzerrungen reduzieren und umgekehrt.

Es gibt mehrere verbreitete Probleme, die durch Oberschwingungen verursacht werden:

- ◆ Durch Oberschwingungsströme verursachte Probleme:
  - ◆ Überlastung von Neutralleitern
  - ◆ Überhitzung von Transformatoren
  - ◆ Fehlauslösung von Leitungsschutzschaltern / Leistungsschaltern
  - ◆ Überbeanspruchung von Kompensations-Kondensatoren
  - ◆ Skinneffekte



- ◆ Durch Oberschwingungsspannungen verursachte Probleme:
  - ◆ Spannungsverzerrungen
  - ◆ Überhitzung und Hochlaufschwierigkeiten von Drehfeldmotoren
  - ◆ Nulldurchgangsstörungen (bei elektronischen Steuerungen, die sich an den Nulldurchgängen orientieren)
- ◆ Rückwirkungen von Oberschwingungsströmen auf das Netz

Jeder dieser Bereiche wird in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

## Oberschwingungsströme

### Überlastung von Neutralleitern

In einem dreiphasigen System sind die Spannungsschwingungen der Phasen gegeneinander um  $120^\circ$  verschoben, so dass der Summenstrom im Neutralleiter, wenn jeder Außenleiter gleich belastet wird, zu Null wird. In der Vergangenheit haben Anlagenbauer (mit Genehmigung der normgebenden Behörden) diese Tatsache genutzt, um Neutralleiter-Querschnitte auf die Hälfte zu reduzieren. Wenn auch die Grundschwingungsströme sich ausgleichen, ist dies jedoch bei den Oberschwingungsströmen nicht der Fall – vielmehr addieren sich die Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung im Neutralleiter. Dieser Effekt ist in Bild 12 dargestellt. In diesem Diagramm sind die Außenleiterströme oben eingetragen und werden in Intervallen von  $120^\circ$  eingeführt. Die Oberschwingung dritter Ordnung jeder Phase ist identisch, da sie die dreifache Frequenz und ein Drittel des Phasen-Versatzes der Grundschwingung hat. Der effektive Neutralleiterstrom der Oberschwingung dritter Ordnung ist im Diagramm unten eingetragen. In diesem Fall ergeben 70 % Strom der Oberschwingung dritter Ordnung in jedem Außenleiter 210 % dieses Stroms im Neutralleiter.

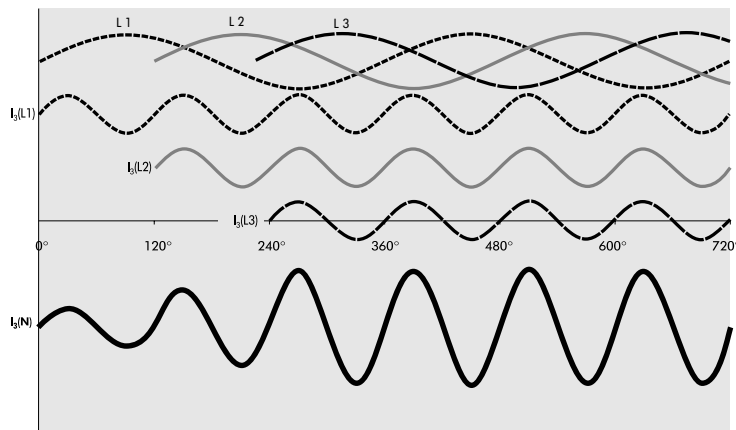


Bild 12: Oberschwingungsströme durch 3 teilbarer Ordnung addieren sich im Neutralleiter

Fallstudien in Gewerbebauten ergeben trotz symmetrischer Aufteilung der Lasten normalerweise Neutralleiterströme von 150 % bis 210 % der Grundschwingungsanteile in den Außenleiterströmen oder bis zu 173 % des Effektivwertes eines jeden Außenleiterstroms – oft in Neutralleitern halben Querschnitts!

Es besteht einige Unklarheit darüber, wie dieses Problem bei der Planung berücksichtigt werden sollte. Sofern einadrige Leitungen verwendet werden, ist die einfachste Lösung der Einbau doppelt starker Neutralleiter. Wenn Mehrleiterkabel verwendet werden, ist die Situation nicht so einfach. Die Nennwerte für Mehrleiterkabel (wie beispielsweise angegeben in IEC 60364-5-523, Tabelle 52) gehen von der Annahme aus, dass die Last ausgeglichen ist und der Neutralleiter keinen Strom führt. Mit anderen Worten: Nur drei der vier oder fünf Leiter führen Strom und erzeugen Wärme. Da die Strombelastbarkeit der Leitung nur durch die Wärmeleistung bestimmt wird, die sie bei der erlaubten Höchsttemperatur ableiten kann, ergibt sich, dass der Nennwert von Leitungen herabgesetzt werden muss, wenn sie Oberschwingungsströme durch drei teilbarer Ordnung führen. In dem oben dargestellten Beispiel führt die Leitung fünf Stromeinheiten – drei in den Außenleitern und zwei im Neutralleiter –, obwohl sie nur für drei Einheiten ausgelegt wurde. Sie sollte nur mit etwa 60 % des Nennstromes belastet werden. In einem „unsauberen“ TN-S-System, in dem mehrfache Verbindungen zwischen Neutral- und Schutzleiter vorkommen, was zumindest in mehrfach gespeisten Netzen fast immer der Fall ist, wird etwa die Hälfte des Stroms, der eigentlich dem N-Leiter zugeordnet ist, über den PE-Leiter fließen. Das entlastet zwar den Neutralleiter und wegen der quadratischen Abhängigkeit der Wärmeleistung vom Strom sogar die gesamte Leitung, muss aber wegen anderer gravierender Nachteile heute auf jeden Fall vermieden werden.

# Ursachen und Auswirkungen

IEC 60364-5-523, Anhang C (Informativ) schlägt einen Reduktionsfaktor entsprechend dem vorhandenen Oberschwingungsstrom durch drei teilbarer Ordnung vor.

Bild 13 zeigt den Reduktionsfaktor, wie er in IEC 60364-5-523, Anhang C, beschrieben wird, und für die thermische Methode, die weiter oben benutzt wurde, aufgetragen über dem Gehalt an Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung.

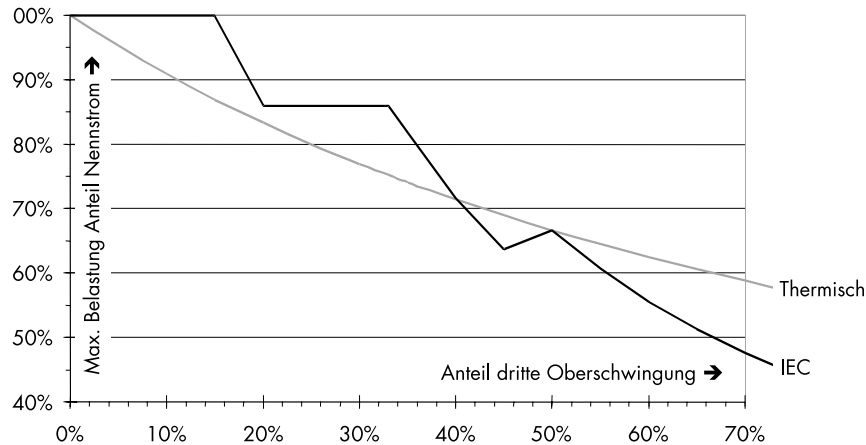


Bild 13: Reduktionsfaktor für Kabel mit Oberschwingungs-Belastung durch 3 teilbarer Ordnung

Die vorhandenen Regelungen werden gegenwärtig diskutiert, und wahrscheinlich werden in näherer Zukunft neue Mindest-Anforderungen und Vorschriften in die nationalen Richtlinien zur Errichtung elektrischer Anlagen aufgenommen.

## Auswirkungen auf Transformatoren

Transformatoren sind auf zweierlei Weise von Oberschwingungen betroffen. Zunächst steigt der Verlust durch Wirbelströme, der normalerweise etwa 10 % des Verlustes bei Volllast beträgt, im Quadrat zur Ordnungszahl an. In der Praxis wären die Verluste eines voll ausgelasteten Transformators, der auch IT-Anlagen speist, insgesamt doppelt so hoch wie bei einer vergleichbaren linearen Last. Daraus ergibt sich eine weit höhere Betriebstemperatur und eine kürzere Lebensdauer. Tatsächlich würde diese sich unter den gegebenen Umständen von etwa 40 Jahren auf eine Spanne verkürzen, die wahrscheinlich eher bei 40 Tagen liegt! Zum Glück werden nur wenige Transformatoren voll ausgelastet, aber der Effekt muss bei der Auswahl der Betriebsmittel berücksichtigt werden.

Der zweite Effekt betrifft Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung. Wenn die durch diese erzeugten Ströme auf eine im Dreieck verschaltete Wicklung zurück transformiert werden, sind sie alle in Phase, so dass die Oberschwingungsströme durch 3 teilbarer Ordnung in der Wicklung zirkulieren. Die Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung werden effektiv von der Wicklung aufgenommen und breiten sich daher nicht im Mittelspannungsnetz aus. Im Dreieck verschaltete Transformatoren sind daher als Trenntransformatoren nützlich. Es ist zu beachten, dass alle Oberschwingungen durchgehen, die nicht durch drei teilbarer Ordnung sind. Bei der Auslegung des Transformators muss der tatsächlich fließende Strom berücksichtigt werden, auch der in der eventuellen Dreieckwicklung zirkulierende, der nach außen (aber eben durch die zusätzliche Erwärmung) nicht in Erscheinung tritt.

Eine detaillierte Erörterung der Nennwerte für Oberschwingungsströme findet sich in einem Abschnitt weiter hinten in diesem Leitfadens.

## Fehlauslösung von Leistungsschaltern und Leitungsschutzschaltern

Fehlerstromschutzschalter (Residual current circuit breakers, RCCB) addieren die Ströme in Außen- und Neutralleiter, und wenn das Ergebnis sich nicht innerhalb der festgelegten Grenzwerte bewegt, wird die Last vom Netz getrennt. Fehlauslösungen durch Oberschwingungen können aus zwei Gründen auftreten. Zum einen ist es möglich, dass der Fehlerstromschutzschalter, da er ein elektromagnetisches Bauteil ist, die höheren Frequenzanteile nicht korrekt summiert und daher fehlerhaft auslöst. Zum anderen erzeugen diejenigen Betriebsmittel, die Oberschwingungen erzeugen, zusätzlich Störungen beim Schalten, die am Stromanschluss der Betriebsmittel herausgefiltert werden müssen. Die Filter, die normalerweise für diesen Zweck verwendet

# Ursachen und Auswirkungen

werden, haben einen Kondensator von allen Außenleitern und vom Neutralleiter gegen Erde und leiten so einen kleinen Strom gegen Erde ab. Dieser Strom ist durch Normen auf weniger als 3,5 mA je Gerät begrenzt und liegt für gewöhnlich weit darunter, aber wenn die einzelnen Betriebsmittel alle an denselben Stromkreis angeschlossen werden, kann der Erdstrom ausreichen, um den Fehlerstromschutzschalter auszulösen. Diese Situation ist leicht zu entschärfen, indem mehrere Stromkreise errichtet werden, die jeweils weniger Lasten versorgen. Ein Abschnitt weiter hinten in diesem Leitfaden wird das Problem hoher Ableitströme ausführlicher behandeln.

Fehlauslösungen von Leitungsschutzschaltern werden normalerweise verursacht, weil der auf Grund von Oberschwingungen im Stromkreis fließende Strom größer ist, als auf der Basis von Berechnungen oder einfachen Messungen zu erwarten war. Die meisten tragbaren Mess-Instrumente messen keine Echt-Effektivwerte (true root mean square TRMS) und können nicht sinusförmige Ströme um bis zu 40 % zu niedrig anzeigen. Die Messung der Echt-Effektivwerte wird in Abschnitt 3.2.2 erörtert.

## Überlastung von Kompensationskondensatoren

Kompensationskondensatoren werden eingesetzt, um einen Strom mit einem voraus eilenden Phasenwinkel aufzunehmen und so einen nacheilenden Strom zu verschieben, der von einer induktiven Last, beispielsweise einem Drehfeldmotor, aufgenommen wird. Bild 14 zeigt das Ersatzschaltbild eines Kompensations-Kondensators mit einer nicht linearen Last. Die Impedanz des Kompensations-Kondensators sinkt, wenn die Frequenz steigt, während die Quell-Impedanz in der Regel induktiv ist und mit der Frequenz steigt. Es ist daher wahrscheinlich, dass der Kondensator ziemlich hohe Oberschwingungsströme aufnehmen muss, und sofern dieser nicht speziell für solche Ströme ausgelegt wurde, kann dadurch ein Schaden eintreten.

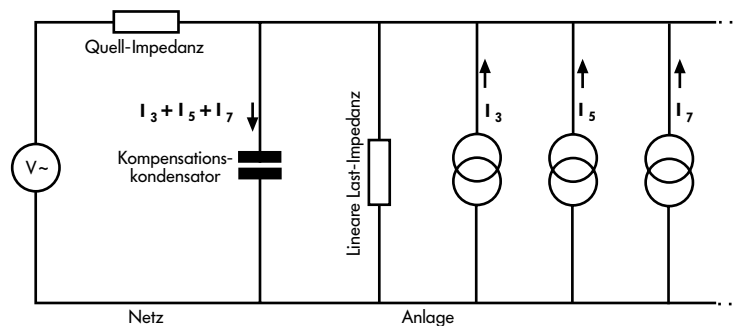


Bild 14: Ersatzschaltbild einer nicht linearen Last mit einem Kompensations-Kondensator

Ein potenziell ernsteres Problem entsteht dadurch, dass der Kondensator und die Streu-Induktivität des Netzes bei oder in der Nähe einer der Oberschwingungsfrequenzen (die natürlich in Intervallen von 100 Hz auftreten) in Resonanz tritt. Tritt dies ein, so können sehr hohe Spannungen und Ströme auftreten, die oft zur Zerstörung der Kondensatoren führen.

Das Auftreten von Resonanzen kann vermieden werden, wenn der Kondensator um einen induktiven Widerstand ergänzt wird, der so mit ihm in Serie geschaltet wird, dass diese Kombination gerade bei der niedrigsten signifikanten Oberschwingung schon induktiv ist (so genannte Verdrosselung von Kondensatoren). Diese Lösung begrenzt auch den Oberschwingungsstrom, der in den Kondensator fließen kann. Die physische Größe der Drossel kann problematisch werden, besonders wenn Oberschwingungen niedriger Ordnung vorhanden sind.

## Skineffekte

Wechselstrom neigt dazu, außen auf der Oberfläche eines Leiters zu fließen. Dieses Verhalten ist als Skin-Effekt bekannt und tritt bei höheren Frequenzen deutlicher auf. Der Skin-Effekt wird normalerweise vernachlässigt, weil er sich bei üblichen Netzfrequenzen nur sehr gering auswirkt. Erst oberhalb von etwa 350 Hz, das heißt, ab der Oberschwingung siebter und höherer Ordnung, wird der Skin-Effekt bedeutsam, da er zusätzlichen Stromwärmeverlust verursacht. Wo Oberschwingungsströme auftreten, sollten Skineffekte beim Entwurf der Anlage berücksichtigt und die Leitungen entsprechend überdimensioniert werden. Es können auch Mehrleiterkabel oder laminierte Stromschienen verwendet werden. Außerdem ist zu beachten, dass die Montagesysteme der Stromschienen so konstruiert sein müssen, dass mechanische Resonanzen bei Oberschwingungsfrequenzen vermieden werden. Konstruktionshinweise für diese beiden Probleme werden in der CDA-Publikation 22 „Copper for busbars“ (Kupfer für Stromschienen) gegeben ([www.cda.org.uk/frontend/pubs.htm#ELECTRICAL/ENERGY%20EFFICIENCY](http://www.cda.org.uk/frontend/pubs.htm#ELECTRICAL/ENERGY%20EFFICIENCY)).

## Oberschwingungsspannungen

Auf Grund der Netz-Impedanz führen Verzerrungen des Laststroms auch zu Verzerrungen der Spannung (dies ist die Ursache für die Abflachung der Spannungsscheitel, im anglo-amerikanischen Sprachraum schon als „flat topping“ bekannt). Die Impedanz setzt sich aus zwei Teil-Impedanzen zusammen: Die der Anlage selbst ab dem gemeinsamen Einspeisepunkt und die des Netzes am gemeinsamen Einspeisepunkt, z. B. dem lokalen Verteiltransformator, vor allem dessen innere Impedanz. Die erstgenannte wird in Bild 15 dargestellt.

Der verzerrte Laststrom, der von der nicht linearen Last aufgenommen wird, verursacht einen verzerrten Spannungsfall in der Leitungs-Impedanz. Die daraus entstehende verzerrte Spannungsschwingung liegt an allen anderen Lasten, die am selben Stromkreis betrieben werden, und verursachen in ihnen Oberschwingungsströme – selbst wenn es sich um lineare Lasten handelt.

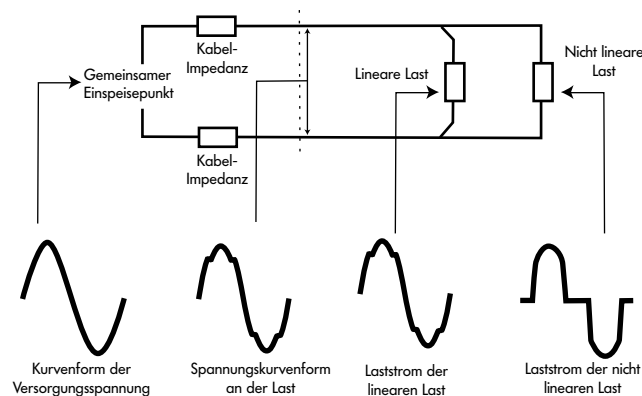


Bild 15: Durch eine nicht lineare Last verursachte Spannungsverzerrung

Dieses Problem lässt sich lösen, indem man Stromkreise, die Oberschwingungen erzeugende Lasten versorgen, von denjenigen Stromkreisen trennt, die auf Oberschwingungen empfindlich reagieren, wie in Bild 16 dargestellt. Hier versorgen getrennte Stromkreise ab dem gemeinsamen Einspeisepunkt die linearen und die nicht linearen Lasten, so dass die durch die nicht linearen Lasten erzeugte Spannungsverzerrung die linearen Lasten nicht erreicht.

Nur allzu oft aber sind beide Typen von Lasten einander identisch, die störenden also zugleich die empfindlichsten. Dann ist diese Methode nicht anwendbar. Hier hilft nur eine niedrigere Netz-Impedanz.

Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb ist und bleibt jedoch darüber hinaus ein „sauberes“ TN-S-System mit nur einer einzigen Verbindung vom Neutraleiter zum Erdungssystem, auch wenn aus mehreren Quellen gleichzeitig gespeist wird. Leider geben die meisten Normen im Gegensatz hierzu noch immer an, den Sternpunkt einer jeden Einspeisung zu erden. Auf den neuesten Stand gebracht sind bisher nur die EN 50174 und die EN 50310.

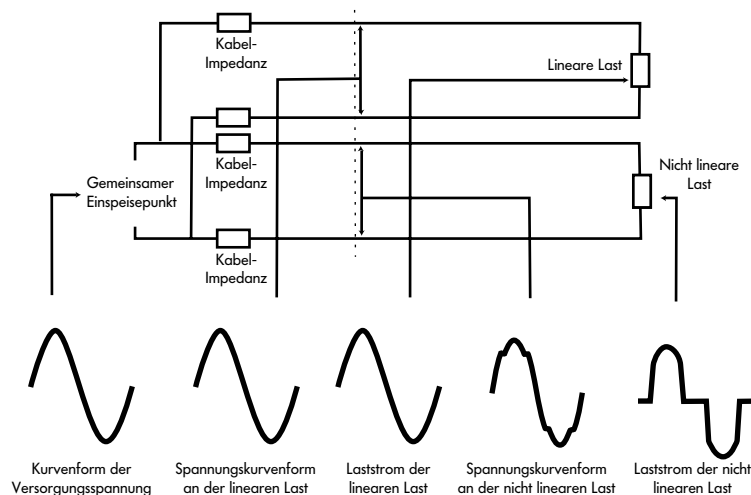


Bild 16: Trennung von linearen und nicht linearen Lasten

# Ursachen und Auswirkungen

---

Wenn man den Umfang der Spannungsverzerrung durch Oberschwingungen betrachtet, sollte man bedenken, dass die Quell-Impedanz und die daraus resultierende Spannungsverzerrung viel höher ausfällt, wenn die Last während eines Netzausfalls auf eine USV-Anlage oder einen Notstromgenerator umgeschaltet wird.

Wo lokale Transformatoren installiert werden, sollten sie so ausgewählt werden, dass sie eine hinreichend niedrige innere Impedanz aufweisen, um die zusätzliche Erwärmung zu verkraften; mit anderen Worten, man sollte einen angemessen überdimensionierten Transformator auswählen. Dabei ist es natürlich nicht sinnvoll, einen Transformator zu wählen, dessen größere Leistung nur durch Zwangskühlung erzielt wird – eine solche Betriebseinheit arbeitet mit erhöhter Innentemperatur und hat eine kürzere Lebensdauer. Zwangskühlung sollte nur für den Notfall reserviert bleiben, aber man sollte sich nie für den Normalbetrieb auf sie verlassen.

## Drehfeldmotoren

Bei Drehfeldmotoren verursachen Spannungsverzerrungen durch Oberschwingungen auf dieselbe Weise Verluste durch Wirbelströme wie bei Transformatoren. Zusätzliche Verluste entstehen allerdings durch die Erzeugung von Oberschwingungsfeldern im Stator, von denen jedes versucht, den Motor bei verschiedenen Drehzahlen entweder vorwärts oder rückwärts zu drehen. Höherfrequente Ströme, die im Rotor induziert werden, vergrößern die Verluste noch mehr.

Wo Spannungsverzerrungen durch Oberschwingungen auftreten, sollten die Motoren nicht voll belastet werden, um sowohl den zusätzlichen Verlusten als auch den geminderten Drehmomenten Rechnung zu tragen.

## Nulldurchgangsstörungen

Viele elektronische Steuerungen ermitteln den Punkt, an dem die Versorgungsspannung zu null wird, um Lasten an eben diesem Punkt einzuschalten. Dies geschieht, um Transienten beim Schalten kapazitiver Lasten zu vermeiden. Dadurch werden elektromagnetische Wechselwirkungen und Störungen in Halbleiter-Schaltungen verringert. Wenn Oberschwingungen und Transienten im Netz auftreten, erhöht sich die Anzahl der Nulldurchgänge der Spannung, und diese sind schwieriger aufzufinden. Dies führt zu fehlerhaftem Betrieb, denn es können mehrere Nulldurchgänge je Halbperiode auftreten.

## Rückwirkungen von Oberschwingungsströmen auf das Netz

Wenn aus dem Netz ein Oberschwingungsstrom fließt, erzeugt dieser einen Spannungsfall proportional zur Quell-Impedanz am gemeinsamen Einspeisepunkt und zum Strom. Da das Versorgungsnetz im Allgemeinen induktiv ist, ist bei höheren Frequenzen auch die Quell-Impedanz höher. Natürlich ist die Spannung am gemeinsamen Einspeisepunkt bereits verzerrt durch die von anderen Verbrauchern aufgenommenen Oberschwingungsströme und durch die den Transformatoren eigenen Verzerrungen, und jeder Verbraucher trägt weiter zur Verzerrung bei.

Selbstverständlich kann es den Kunden nicht gestattet werden, auf Kosten der anderen Verbraucher das Netz zusätzlich zu verschmutzen. Daher haben die EVU in den meisten Ländern Regelungen eingeführt, die die Höhe des zulässigen Oberschwingungsstroms festlegen. Viele dieser Richtlinien basieren auf der Norm G5/3 der UK Electricity Association.

## Maßnahmen zur Begrenzung von Oberschwingungen

Die Maßnahmen, die zur Unterdrückung von Oberschwingungsströmen zur Verfügung stehen, werden in späteren Abschnitten dieses Leitfadens erörtert. In diesem Abschnitt wird ein kurzer, allgemeiner Überblick gegeben.

Die Begrenzungsmethoden lassen sich grob in drei Gruppen einteilen: Passive Filter, Trenntransformatoren und Oberschwingungs-Reduktionstransformatoren und aktive Filter. Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile, so dass es keine Einzellösung gibt, die besser wäre als alle anderen. Nur zu leicht wird eine erhebliche Summe in eine unangemessene und wenig wirksame Lösung investiert. Die Moral: Man führe eine gründliche Voruntersuchung durch – die für diesen Zweck geeigneten Werkzeuge werden an einer anderen Stelle in diesem Leitfaden beschrieben.

### Passive Filter

Passive Filter werden benutzt, um einen niederimpedanten Pfad für Oberschwingungsströme zu schaffen, so dass sie in den Filter fließen und nicht zurück ins Netz (Bild 17). Je nach den Erfordernissen können Filter für eine einzelne Oberschwingung oder für eine große Bandbreite ausgelegt werden.

# Ursachen und Auswirkungen

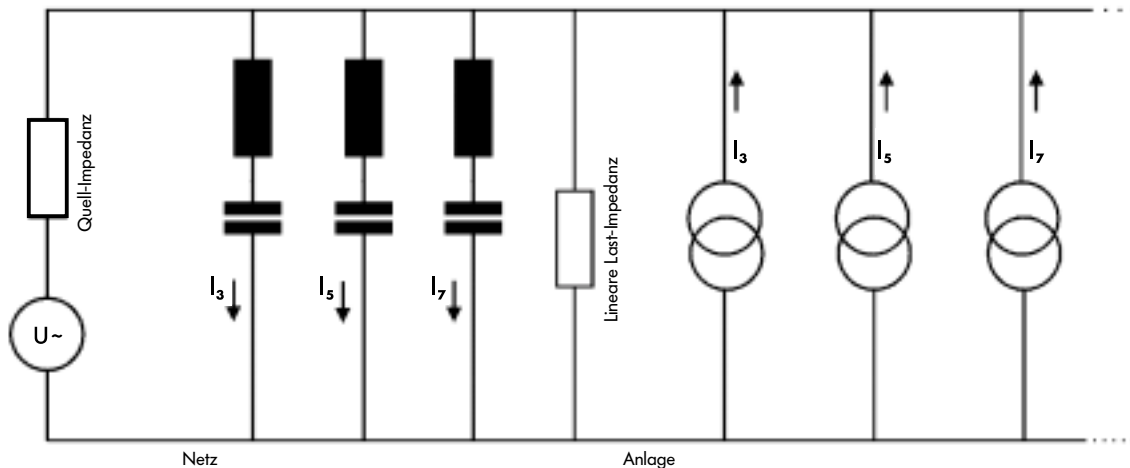


Bild 17: Passive Oberschwingungs-Saugkreisfilter

Manchmal ist es erforderlich, einen komplexen Filter zu entwerfen, um die serielle Impedanz bei Oberschwingungsfrequenzen zu erhöhen und so den Stromanteil zu reduzieren, der zur Stromversorgung zurückfließt, wie in Bild 18 dargestellt.

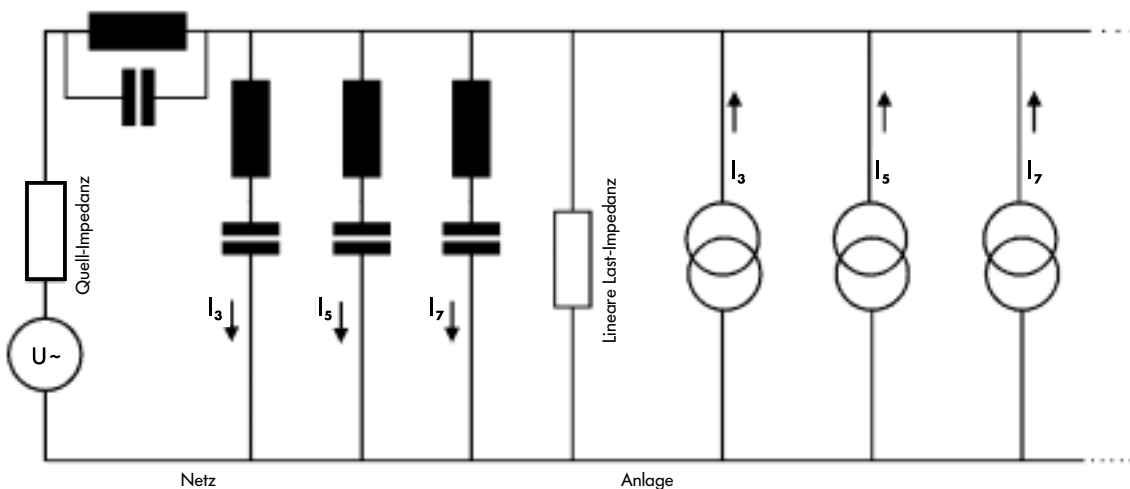


Bild 18: Passive Saugkreise mit einem Sperrkreis

Gelegentlich werden einfache Bandsperrfilter (Sperrkreise) in Serie zur Verbraucheranlage vorgeschlagen, entweder im Außen- oder im Neutralleiter. Ein solcher Sperrkreis hat den Zweck, die Oberschwingungsströme zu blockieren, statt ihnen einen kontrollierten Pfad zu bieten, so dass ein sehr hoher Oberschwingungsspannungsfall entsteht. Diese Oberschwingungsspannung tritt dann auf der Lastseite in Erscheinung. Da die Spannung an der Last nun stark verzerrt ist, bewegt sie sich nicht mehr innerhalb der Normen, für die die Betriebsmittel entworfen wurden und für die Garantie übernommen wird. Einige Betriebsmittel sind gegen diese Verzerrung relativ unempfindlich, andere jedoch reagieren sehr anfällig. Unter bestimmten Gegebenheiten können Sperrkreisfilter nützlich sein, sollten jedoch mit Vorsicht eingesetzt werden; sie können nicht als generelle Lösung für jeden Zweck empfohlen werden.

## Trenntransformatoren

Wie zuvor erwähnt, fließen in den Dreieckwicklungen von Transformatoren Ströme durch 3 teilbarer Ordnung. Obwohl dies für den Transformatorenhersteller und -lieferanten ein Problem darstellt – die zusätzliche Last muss berücksichtigt werden –, ist es für die Anlagenplaner von Nutzen, weil es die Oberschwingungen durch 3 teilbarer Ordnung vom Netz fern hält (Bild 19).

# Ursachen und Auswirkungen

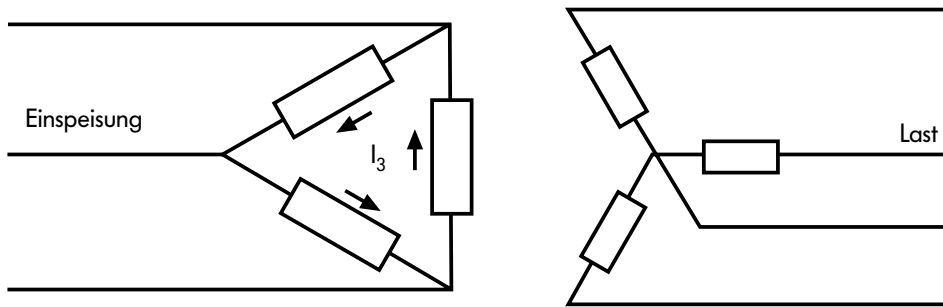


Bild 19: im Dreieck verschalteter Trenntransformator

Derselbe Effekt lässt sich erzielen, indem man einen Transformator mit Zickzackwicklung einsetzt. Die Zickzackwicklung ist eine Kombination aus Stern- und Dreieckschaltung.

## Aktive Filter

Die bisher erwähnten Lösungen waren nur für bestimmte Oberschwingungen einsetzbar: Die Trenntransformatoren sind nur bei Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung nützlich und passive Filter nur für diejenigen Oberschwingungsfrequenzen, auf die sie abgestimmt wurden. In manchen Anlagen ist der Gehalt an Oberschwingungen jedoch nicht so leicht vorherzusehen. In vielen IT-Anlagen zum Beispiel ändern sich Zusammensetzung und Standorte der Betriebsmittel ständig, so dass sich auch das Oberschwingungsprofil ständig wandelt. Eine günstige Lösung dieses Problems lässt sich durch aktive Filter erreichen.

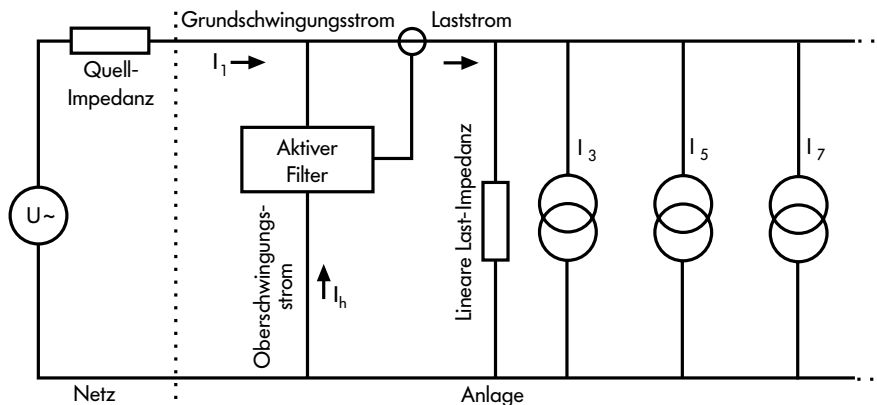


Bild 20: Aktiver Netzfilter

Wie in Bild 20 dargestellt, ist der aktive Filter ein Nebenschlussbauteil. Ein Stromwandler misst den Oberschwingungsgehalt des Laststroms und steuert einen Stromgenerator. Dieser produziert ein genaues Abbild, das bei der nächsten Periode wieder in das Netz eingespeist wird. Da der Oberschwingungsstrom aus dem aktiven Netzfilter gespeist wird, wird aus der Stromversorgung nur der Grundschwingungsstrom aufgenommen. In der Praxis wird so der Umfang des Oberschwingungsstroms um bis zu 90 % gesenkt, und da die Quell-Impedanz bei Oberschwingungsfrequenzen reduziert wird, wird auch die Spannungsverzerrung reduziert.

## Schlussfolgerungen

Nahezu alle modernen elektrischen und elektronischen Betriebsmittel enthalten ein SNT oder steuern in der einen oder anderen Form die Leistungen und sind dem zu Folge nicht lineare Lasten. Lineare Lasten sind vergleichsweise selten; die einzigen weit verbreiteten Beispiele sind nicht gedimmte Glühlampen und unregelmäßige Heizgeräte.

In einem späteren Abschnitt dieses Leitfadens werden künftige Normen und Standards für Betriebsmittel genauer diskutiert. Diese sind allerdings noch nicht eng genug gefasst, um wirklich Einfluss auf die Verschmutzung durch Oberschwingungen zu nehmen, die durch elektronische Betriebsmittel wie PCs verursacht wird. Es sind genau solche Betriebsmittel, die viele der Oberschwingungsprobleme verursachen, die heute in

# *Ursachen und Auswirkungen*

---

Industrie und Handel beobachtet werden. Dies liegt zum Teil daran, dass so viele davon installiert sind, zum Teil jedoch auch daran, dass die Art der Oberschwingungen, die sie erzeugen – die Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung – so viele Probleme verursachen.

Bei der zunehmenden Zahl der installierten Betriebsmittel und ohne sehr strenge Standards, die durch rigide Kontrollmaßnahmen durchgesetzt und unterstützt werden, ist es wahrscheinlich, dass die Verschmutzung durch Oberschwingungen weiter zunehmen wird. Dies ist ein wirtschaftliches Risiko, das man durch Investitionen in gute Planung der Anlagen, die richtige Wahl der elektronischen Ausrüstung und Betriebsmittel sowie sorgfältige Instandhaltung in den Griff bekommen kann.



# *Notizen*

---

# *Notizen*

---

# Leonardo Netzwerk-Partner:

## **Copper Benelux**

Tervurenlaan 168  
B-1150 Brussels  
Belgien

Tel.: 0032 / 2 / 7777090  
Fax: 0032 / 2 / 7777099  
E-Mail: [mail@copperbenelux.org](mailto:mail@copperbenelux.org)  
Internet: <http://www.copperbenelux.org>

Kontakt: Herr B. Dôme

## **Copper Development Association**

5 Grovelands Business Centre  
Boundary Way  
Hemel Hempstead HP2 7TE  
Großbritannien

Tel.: 0044 / 1442 / 275700  
Fax: 0044 / 1442 / 275716  
E-Mail: [copperdev@compuserve.com](mailto:copperdev@compuserve.com)  
Internet: <http://www.cda.org.uk>  
[www.brass.org](http://www.brass.org)

Kontakt: Frau A. Vessey

## **Deutsches Kupferinstitut e.V.**

Am Bonnhof 5  
D-40474 Düsseldorf  
Deutschland

Tel.: 0049 / 211 / 4796-300  
Fax: 0049 / 211 / 4796-310  
E-Mail: [sfassbinder@kupferinstitut.de](mailto:sfassbinder@kupferinstitut.de)  
Internet: <http://www.kupferinstitut.de>

Kontakt: Herr S. Fassbinder

## **ECD Services**

Via Pietro Rondoni 11  
I-20146 Milano  
Italien

Tel.: 0039 / 02 / 4237041  
Fax: 0039 / 02 / 48309976  
E-Mail: [baggini@ecd.it](mailto:baggini@ecd.it)

Kontakt: Dr. A. Baggini

## **European Copper Institute**

Tervurenlaan 168 / b 10  
B-1150 Brussel  
Belgien

Tel.: 0032 / 2 / 7777070  
Fax: 0032 / 2 / 7777079  
E-Mail: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Internet: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)

Kontakt: Herr H. De Keulenaer

## **HTW Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes**

Goebenstraße 40  
D-66117 Saarbrücken  
Deutschland

Tel.: 0049 / 681 / 5867-0  
Fax: 0049 / 681 / 5867-302  
E-Mail: [wlang@htw.uni-sb.de](mailto:wlang@htw.uni-sb.de)

Kontakt: Herr Prof. W. Langguth

## **Istituto Italiano del Rame**

Via Corradino d'Ascanio 4  
I-20142 Milano  
Italien

Tel.: 0039 / 02 / 8930-1330  
Fax: 0039 / 02 / 8930-1513  
E-Mail: [vloconsolo@iir.it](mailto:vloconsolo@iir.it)  
Internet: <http://www.iir.it>

Kontakt: Herr V. Loconsolo

## **KU Leuven**

Kasteelpark Arenberg 10  
B-3001 Leuven-Heverlee  
Belgien

Tel.: 0032 / 16 / 321021  
Fax: 0032 / 16 / 321985  
E-Mail: [ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be](mailto:ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be)

Kontakt: Herr Prof. R. Belmans

## **Polskie Centrum Promocji Miedzi SA**

Pl. 1 Maja 1-2  
PL-50-136 Wrocław  
Polen

Tel.: 0048 / 71 / 7812502  
Fax: 0048 / 71 / 7812504  
E-Mail: [copperpl@wroclaw.top.pl](mailto:copperpl@wroclaw.top.pl)

Kontakt: Herr P. Jurasz

## **TU Bergamo**

Viale G Marconi 5  
I-24044 Dalmine (BG)  
Italien

Tel.: 0039 / 035 / 277307  
Fax: 0039 / 035 / 562779  
E-Mail: [graziana@unibg.it](mailto:graziana@unibg.it)

Kontakt: Prof R. Colombi

## **TU Wrocław**

Wybrzeze Wyspianskiego 27  
PL-50-370 Wrocław  
Polen

Tel.: 0048 / 71 / 3280192  
Fax: 0048 / 71 / 3203596  
E-Mail: [i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl](mailto:i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl)

Kontakt: Herr Prof. H. Markiewicz

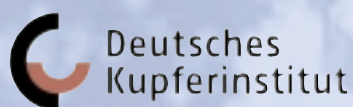


*David Chapman*

 **Copper Development Association**

5 Grovelands Business Centre  
Boundary Way  
Hemel Hempstead HP2 7TE  
Großbritannien

Tel.: 0044 / 1442 / 275700  
Fax: 0044 / 1442 / 275716  
E-Mail: [copperdev@compuserve.com](mailto:copperdev@compuserve.com)  
Internet: <http://www.cda.org.uk>  
[www.brass.org](http://www.brass.org)



Deutsches Kupferinstitut  
Am Bonneshof 5  
D-40474 Düsseldorf

Tel.: +49 211 4796300  
Fax: +49 211 4796310  
E-Mail: [info@kupferinstitut.de](mailto:info@kupferinstitut.de)  
Internet: [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de)



European Copper Institute  
Tervurenlaan 168 / b 10  
B-1150 Brussel

Tel.: +32 2 7777070  
Fax: +32 2 7777079  
E-Mail: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)