

Störungssuche bei Oberschwingungen

Grundlegende Fehlersuche mit Multimetern und Stromzangen

Anwendungsbericht

Scheinbar unerklärliche Effekte treten derzeit in modernen Bürogebäuden und Industrieanlagen auf. Der normalen Netzlast entsprechend bemessene Transformatoren sind übermäßig erwärmt, Neutralleiter in symmetrisch belasteten Netzen sind überhitzt, und Schutzschalter lösen ohne scheinbaren Grund aus. Herkömmliche Messgeräte und Methoden zur Fehlersuche geben keine besonderen Hinweise. Worin liegt das Problem? In der Überlagerung des Netzes mit Oberschwingungen.

Neue Herausforderung, moderne Technologien

Oberschwingungen sind eine Folgeerscheinung moderner Elektronik. Sie treten besonders im Anschlussbereich von Computern, bei elektronischen Drehzahlregelungen für Elektromotoren und bei getakteten Stromversorgungen auf. Diese elektrischen Geräte ziehen nur während eines definierten Zeitintervalls einen Strom (Abbildung 1). Während hierdurch einerseits die Effektivität erhöht wird, hat dieses Verfahren jedoch die Überlagerung des Stroms mit Oberschwingungen zur Folge.

Diese Art der Netzurückwirkung stellt eine erhebliche Belastung für Transformatoren, Neutralleiter und Schutzschalter dar.

Die Netzfrequenz von 50 Hz der Stromversorgung erzeugt normalerweise ein monotones Brummen. Dem Netz überlagerte Oberschwingungen werden als zusätzlich höhere Frequenzen hörbar.

Bei der Betrachtung dieser Wellenform wird das Problem der Oberschwingungen noch offensichtlicher. Die Netzspannung von 50 Hz erscheint auf einem Oszilloskop als nahezu ideale Sinuswelle. Durch die Überlagerung der Netzspannung mit Oberschwingungen wird die sinusförmige Wellenform erheblich verzerrt (Abbildung 2A und 2B). Diese verzerrten Wellenformen werden als nichtsinusförmig bezeichnet. Spannung und Strom sind nicht mehr linear voneinander abhängig.

Die detaillierte Analyse

Die Auswirkungen der Oberschwingungen im Netz sind relativ leicht zu erkennen. Da aber die Ursachen der Oberschwingungen nicht so offensichtlich sind, ist eine geeignete Analyse und Fehlersuche unbedingt erforderlich. Dieser Anwendungsbericht will einige grundlegende Hinweise zum Aufspüren von Oberschwingungen geben und praktische Lösungsansätze aufzeigen. Für eine detailliertere Analyse sind jedoch spezielle Methoden und Messgeräte, wie ein Oberschwingungsanalysator erforderlich.

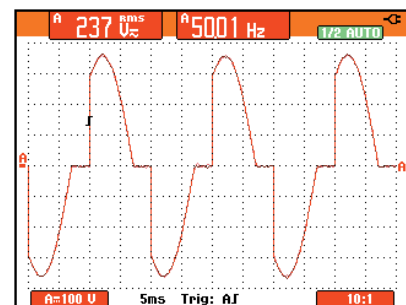


Abbildung 1. Thyristorspannung

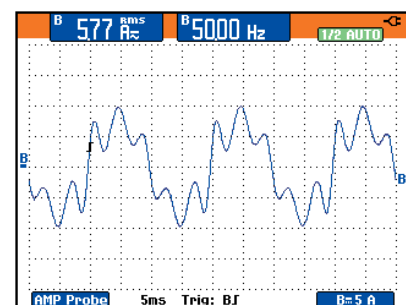


Abbildung 2A. Verzerrte Strom-Wellenform

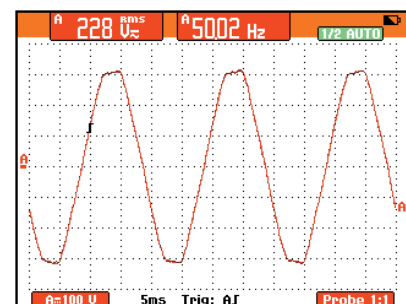


Abbildung 2B. Verzerrte Spannungs-Wellenform

Entstehung von Oberschwingungen

Allgemeines über Oberschwingungen

Oberschwingungen sind Ströme oder Spannungen bestehend aus Frequenzen mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz. Bei einer Grundfrequenz von 50 Hz ist die Frequenz der zweiten Harmonischen 100 Hz, die der dritten 150 Hz, usw.

Oberschwingungen entstehen durch nichtlineare Netzlasten, die kurzzeitige and steilflankige Stromimpulse erzeugen. Diese Impulse bewirken Verzerrungen der Netzspannung und treten als Netzurückwirkungen auch an anderen Stellen des Versorgungsnetzes auf.

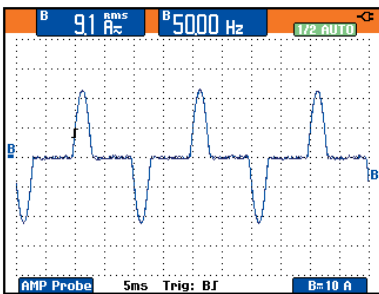


Abbildung 3A. nichtlineare Strom-Signalforn, einphasig

Ursachen von Oberschwingungen

Oberschwingungen entstehen überwiegend an Geräten, die mit Wechselspannung versorgt werden und einen Stromrichter mit kapazitiver Glättung enthalten, wie zum Beispiel Computer, Drucker and medizinische Analysegeräte.

Die Stromversorgung dieser Geräte formt die am Eingang anliegende Wechselspannung durch Gleichrichtung and Aufladen eines großen Kondensators in eine Gleichspannung um.

Nach einer Halbwelle ist der Kondensator auf den Spitzenwert der sinusförmigen Wechselspannung aufgeladen (bei 230 V_{eff} auf den Spitzenwert von 325 V). Am Kondensator wird der Gleichstrom zur Versorgung der nachgeschalteten Stromkreise entnommen.

Bei diesen Geräten treten nur kurzzeitige (pulsförmige) Ströme jeweils beim Spannungsmaximum zum Nachladen des Glättungskondensators auf. Ist die eingangsseitige Wechselspannung kleiner als die Kondensatorspannung, so wird dem Netz kein Strom entnommen.

Derartige Stromversorgungen, integriert in vielen Bürogeräten, sind typische nichtlineare Einphasen-Lasten. In Industrieanlagen sind die Verursacher für Oberschwingungen die nichtlinearen Dreiphasen-Lasten, wie z.B. drehzahlregelte Motorantriebe and unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV).

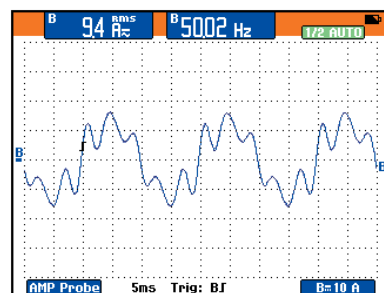


Abbildung 3B. nichtlineare Strom-Signalforn, dreiphasig

Oberschwingungsspannungen

Das Stromversorgungsnetz kann indirekt zu der Entstehung von Oberschwingungen beitragen.

Der von einer nichtlinearen Last erzeugte Oberschwingungsstrom bewirkt nach dem Ohmschen Gesetzes an der Ausgangsimpedanz des Transformators eine Oberschwingungsspannung. Die Ausgangsimpedanz setzt sich aus dem Widerstand des Transformators and des Stromkreises zusammen. Ein Oberschwingungsstrom von 10 A erzeugt in Verbindung mit einer Ausgangsimpedanz von 0.1 Ohm eine Oberschwingungsspannung von 1.0 Volt. Andere am Transformator angeschlossene Lasten werden durch eine am selben Transformator angeschlossene große nichtlineare Last beeinflusst.

Ein Personal Computer kann durch im Netz enthaltene Oberschwingungsspannungen gestört werden. Die einwandfreie Funktion der Stromversorgung mit der Dioden/Kondensator-Schaltung ist von dem Wert and Verlauf der Spitzenspannung des Netzes stark abhängig. Oberschwingungsspannungen können die sinusförmige Netzspannung abflachen, den Wert der Spitzenspannung verringern and so einen Reset des Computers zur Folge haben.

In Industrienetzen belasten die Oberschwingungsspannungen zusätzlich die Komponenten der Blindleistungskompensation.

Die Kondensatoren der Blindleistungskompensation bilden mit der Kurzschlussreaktanz des vorgelagerten Transformators Resonanzkreise. Liegt eine Resonanzstelle dieser parasitären Schwingkreise im Bereich der Frequenz der Oberschwingungsspannungen, so kann dies zur Überlastung der Leistungskondensatoren führen. Durch Ansprechen der Kondensatorsicherung wird der Schwingkreis verstimmt and die Resonanzstelle verschwindet.

Auswirkungen von Oberschwingungen

Oberschwingungen treten häufig in Versorgungsnetzen mit nichtlinearen Lasten auf, wobei zwischen einphasigen und dreiphasigen nichtlinearen Lasten unterschieden wird.

Einphasige nichtlineare Lasten befinden sich überwiegend in Bürogebäuden, während in Industrieanlagen dreiphasige Lasten eingesetzt werden. Einzelne Komponenten des Versorgungsnetzes beeinflussen die Bildung und Auswirkung von Oberschwingungen unterschiedlich. Ihre nicht zu vernachlässigende Rückwirkungen auf das Netz verringern die Qualität der Stromversorgung unter Umständen erheblich, wobei Betriebsstörungen nicht auszuschließen sind.

Neutralleiter

Der Neutralleiter in dreiphasigen Netzen mit vier Leitern kann durch nichtlineare Lasten von 230 Volt-Nebenstromkreisen wesentlich beeinflusst werden. Bei symmetrischer Belastung des Drehstromnetzes mit linearer Last heben sich die Komponenten der 50 Hz Grundschwingung im Neutralleiter auf.

In einem Vierleiter-Netz mit einphasigen nichtlinearen Lasten entstehen ungeradzahlige Oberschwingungen der dritten, neunten, fünfzehnten Ordnung, usw., die sich im Neutralleiter addieren. In Netzen mit vielen einphasigen nichtlinearen Lasten kann der Strom im Neutralleiter den momentanen Strom der Phasenleiter überschreiten. Da der Neutralleiter nicht abgesichert ist, besteht die Gefahr der Überlastung durch hohe Ströme.

Der hohe Stromwert im Neutralleiter hat eine erhöhte Spannung zwischen Neutralleiter und Erdung an den 230 V-Stromanschlusspunkten zur Folge.

Schutzeinrichtungen

Die üblichen thermomagnetischen Schutzschalter lösen durch die Erwärmung eines Bimetallstreifens aus und unterbrechen den Stromkreis. Konstruktiv bedingt lösen diese Schutzschalter aufgrund des Effektivwertes des Stromes bei einer

bestimmten Temperatur aus. Dieser Typ von Schutzschalter eignet sich besonders für den Betrieb bei Oberschwingungen im Netz.

Eine elektronische Spitzenwert-sicherung löst auf den Spitzenwert der Wellenform des Stroms aus. Da der Spitzenwert einer Wellenform durch die Oberschwingungen vergrößert wird, lösen diese Sicherungen unter Umständen vorzeitig bei einem kleineren Stromwert aus. Wird die Wellenform des Stroms durch Oberschwingungen abgeflacht, löst der Schutzschalter verspätet, bei einem zu großen Stromwert, aus.

Sammelschienen und Anschlussverbindungen

Neutralleiter-Sammelschienen und Anschlussverbindungen sind für den vollen Phasenstrom ausgelegt. Die sich addierenden Oberschwingungsströme der dritten Ordnung können jedoch zu einer Überlastung des Neutralleiters führen.

Elektrische Verteilungen

Dem Netz überlagerte Oberschwingungen können innerhalb einer Stromverteilung zu einer erheblichen Geräuschentwicklung führen. In einer für die Netzfrequenz von 50 Hz ausgelegten Verteilung bewirken die Magnetfelder der Oberschwingungsströme mechanische Resonanzen. Vibrationen werden hörbar im Frequenzbereich der Oberschwingungen.

Telekommunikation

Anlagen zur Telekommunikation geben sehr oft die ersten Hinweise für Oberschwingungen. Die Kabel dieser Anlagen verlaufen meist in der unmittelbaren Nähe der Stromversorgungsleitungen. Zur Vermeidung der induktiven Beeinflussung werden die Niederspannungskabel möglichst in der Nähe der Neutralleiter verlegt.

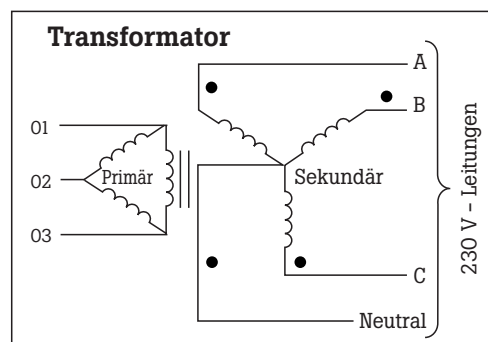
Oberschwingungen dritter Ordnung übertragen sich auch induktiv und sind deshalb auf einer Fernsprechleitung zu hören. Dies sind oft die ersten Hinweise für Oberschwingungen im elektrischen Versorgungsnetz. Zum direkten Nachweis der Oberschwingungen sind jedoch Messungen am Versorgungsnetz durchzuführen.

Transformatoren

Geschäftsgebäude sind gewöhnlich über einen 400/230 V Transformator in Dreieck-Stern-Schaltung an das öffentliche Netz angeschlossen. Die Sekundärseite des Transformators versorgt über die Verteilung die Stromanschlüsse innerhalb des Gebäudes. Angeschlossene nichtlineare Einphasen-Lasten erzeugen Oberschwingungen, die sich im Neutralleiter addieren.

Probleme bei Transformatoren entstehen durch die Erhöhung der Eisen- und Kupferverluste. Netztransformatoren sind für den Betrieb mit einer Netzfrequenz von 50 Hz ausgelegt.

Die höherfrequenten Oberschwingungen vergrößern die Eisenverluste aufgrund der entstehenden Wirbelströme und der Ummagnetisierungseffekte. Weiterhin treten zusätzliche Kupferverluste durch die Auswirkungen des Skin-Effektes auf. Die Folge ist eine Zunahme der Wärmeentwicklung gegenüber dem Normalbetrieb bei 50 Hz. Zur Vermeidung einer Überlastung ist der Transformator mit einer geringeren Leistung zu betreiben oder gegen einen speziell dimensionierten Typ auszutauschen.



Generatoren

Notstromgeneratoren übernehmen bei Netzausfall die Versorgung an Stelle der Transformatoren. Sie versorgen die gleichen nichtlinearen Lasten wie zum Beispiel Datenverarbeitungsanlagen und sind häufig weitaus stärker den Belastungen durch Oberschwingungen ausgesetzt. Neben der Überhitzungsgefahr kann die Stromwellenform im Bereich des Nulldurchganges verzerrt werden und die Generatorsteuerung stören.

Klassifizierung der Oberschwingungen

Jede Oberschwingung hat ihre eigene Ordnungszahl, Frequenz und Drehfeldrichtung. Das Vorzeichen gibt die Drehrichtung bezogen auf die Grundschiwingung (F) an. In einem Asynchronmotor erzeugt eine positiv drehende Oberschwingung ein Magnetfeld, das mit der Grundschiwingung rotiert. Eine negativ drehende Oberschwingung rotiert in entgegengesetzter Richtung. Die ersten neun Oberschwingungen und ihre Auswirkungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Bezeichnung	F	2a*	3e	4e*	5e	6e*	7e	8e*	9e
Frequenz	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Vorzeichen	+	-	0	+	-	0	+	-	0

*Geradzahlige Oberschwingungen heben sich bei symmetrischen Wellenformen auf

Vorzeichen	Drehrichtung	Auswirkung (Skin-Effekt, Wirbelströme, usw.)
Positiv	Vorwärts	Erwärmung von Leitern, Schutzschaltern usw.
Negativ	Rückwärts	Erwärmung wie oben + Motorprobleme
0**	Keine	Erwärmung und Addition im Neutralleiter eines Vierleiternetzes von dreiphasigen Vierleiter-Systemen

**Neutralleiterströme (ungeradzahlige Vielfache 3ter, 9ter, 15ter, 21ter Ordnung usw)

Aufspüren von Oberschwingungen

Der Überblick über das gesamte Versorgungsnetz kann bereits wesentliche Hinweise auf Erzeuger von Oberschwingungen und die erforderlichen Maßnahmen zur Fehlersuche geben. Folgende Hinweise helfen wesentlich beim Erkennen von Oberschwingungen.

1. Erfassung der gesamten Netzlasten.

Erfassung der Größe und der Art der am jeweiligen Netz zugeschalteten Lasten. Sind eine erhebliche Anzahl von Personal Computern und Druckern, drehzahlgeregelte Motorantriebe, Heizungssteuerungen mit Halbleitern und Beleuchtungsanlagen mit Leuchtstofflampen installiert, sind dem Netz mit großer Wahrscheinlichkeit Oberschwingungen überlagert.

2. Transformatoren auf Erwärmung prüfen.

In Netzen mit nichtlinearen Lasten die Transformatoren auf eine übermäßige Wärmeentwicklung überprüfen. Durch entsprechende Be- und Entlüftung die Kühlung der Transformatoren sicherstellen.

3. Sekundärstrom des Transformators messen.

Mit einem Echt-Effektivwert Messgerät die Lastströme des Transformators messen.

- Die verwendeten Messgeräte müssen eine für die Transformormessung ausreichende Spannungsfestigkeit besitzen.
- Messung und Erfassung des Sekundärstroms jeder Phase und des Neutralleiters (falls vorhanden).
- Berechnung der gesamten

Leistungsaufnahme der Last in kVA und Vergleich mit dem Transformator-Nennwert in kVA des Leistungsschildes.

Hinweis: Sind dem Netz Oberschwingungen überlagert, kann sich der Transformator übermäßig erwärmen und überlastet werden, obwohl die gemessene Belastung in kVA unter dem Nennwert des Transformators liegt.

- Bei einem Vierleitersystem ist der gemessene Strom durch den Neutralleiter mit dem Stromwert zu vergleichen, der aufgrund einer unsymmetrischen Belastung der Phasen im Neutralleiter hervorgerufen wird. (Der Neutralleiterstrom wird bestimmt durch die vektorielle Summe der einzelnen Phasenströme und ist bei symmetrischer Belastung Null). Ist der Neutralleiterstrom übermäßig hoch, sind wahrscheinlich Oberschwingungen dritter Ordnung im Netz vorhanden. Die Belastung des Transformators ist dann zu reduzieren.
- Messung der Frequenz des Neutralleiterstroms. 150 Hz sind kennzeichnend für sich addierende Oberschwingungen dritter Ordnung.

4. Überprüfung der Neutralleiter in der Verteilung.

Verteilungen mit angeschlossenen nichtlinearen Lasten sind besonders zu überprüfen. Messung des Stroms in jedem Nebenstromkreis und Vergleich der Messwerte mit der zulässigen

Querschnittsbelastung für jeden Leiter. Überprüfung der Neutralleiter-Sammelschiene und der Anschlussverbindungen auf Erwärmung oder Verfärbung. Ein Infrarotthermometer wie das Fluke 61 ist hilfreich für das Feststellen von Überhitzung bei Sammelschienen und Anschlüssen.

5. Messung der Spannung zwischen Neutralleiter und Erdung.

Die Überlastung des Neutralleiters in vielverzweigten Stromnetzen kann auch durch Messung der Spannung zwischen Neutralleiter und Erdung an einem Stromanschlusspunkt (Steckdose) nachgewiesen werden. Die Spannungsmessung wird bei eingeschalteten Lasten durchgeführt. Ein Spannungswert unterhalb 2 Volt ist unkritisch. Spannungen über 2 Volt weisen auf eine zu große Leitungslänge oder Übergangswiderstände hin. Eine gemessene Frequenz von 150 Hz ist kennzeichnend für die Überlagerung mit Oberschwingungen dritter Ordnung. Die Frequenz von 50 Hz weist dagegen auf eine unsymmetrische Belastung der einzelnen Phasen hin. Bei einzelnen Büroräumen mit gemeinsamer Versorgung wird der Neutralleiter von den drei Phasen gleichzeitig genutzt. Die typischen Netzlasten, wie Computer und Büromaschinen, verursachen sehr oft eine Überlastung des Neutralleiters.

Messgeräte zur Fehlersuche

Um überlagerte Oberschwingungen auf einem Netz zu erfassen, ist der Echt-Effektivwert und der momentane Spitzenwert (Scheitelwert) der Wellenform zu messen. Dafür benötigen Sie entweder eine Strommesszange wie Fluke 335, 336 oder 337 oder ein Multimeter der Serien Fluke 170 und Fluke 180, mit denen Echteffektivwert-Messungen möglich sind. "Echt-Effektiv" bezieht sich auf den quadratischen Mittelwert bzw. auf das Wärmeäquivalent einer Strom- oder Spannungswellenform. "Echt" bezeichnet die Messart dieser Messgeräte aufgrund der verwendeten Art der Messwertwandlung. Viele der preiswerten portablen Strommesszangen arbeiten mit der einfachen Mittelwertbildung. Diese Messgeräte liefern eine richtige Anzeige nur für die reine sinusförmige Wellenform, zeigen aber einen zu niedrigen Messwert bei anderen Wellenformen an. Der angezeigte Messwert liegt durch die einfache Mittelwertbildung bis zu 50% unter dem wahren Messwert von Strom oder Spannung.

Echt-Effektiv-Messgeräte messen den richtigen Wert für jede Wellenform innerhalb der angegebenen Bandbreite und der Spezifikation des Crest-Faktors.




Crest-Faktor

Der Crest-Faktor einer Wellenform ist das Verhältnis von Spitzenwert (Scheitelwert) zum Effektivwert. Für eine sinusförmige Wellenform beträgt der Crest-Faktor $\sqrt{2}$ bzw. 1,414. Echt-Effektiv-Messgeräte besitzen eine bestimmte Crest-Faktor-Spezifikation, innerhalb der eine fehlerfreie Messung des Spitzenwertes möglich ist. Bei einem Echt-Effektivwert Handmultimeter von hoher Qualität bezieht sich der Crest-Faktor von 3,0 auf den maximalen Skalenendwert. Dieser Wert ist weit mehr als ausreichend für die meisten Messungen an Versorgungsnetzen. Der Crest-Faktor verdoppelt sich, wenn der Messwert den halben Skalenendwert erreicht. Das Multimeter Fluke 187 hat z.B. einen Crest-Faktor von bis zu 3,0 bei einer Messung mit 400 V AC und einen Crest-Faktor von bis zu 6,0 bei einer Messung von 200 V AC.

Mit einem Echteffektivwert-Multimeter mit einer "Peak"-Funktion - wie dem Fluke 187 - kann der Crest-Faktor leicht berechnet werden. Weicht der Crest-Faktor vom Wert 1,414 ab, sind dem Netz Oberschwingungen überlagert. In einfachen einphasigen Netzen gilt, je größer die Abweichung von dem Wert 1,414, desto größer ist der Anteil von Oberschwingungen. Durch Oberschwingungsspannungen abgeflachte Wellenformen ergeben einen Crest-Faktor unterhalb von 1,414. Bei Oberschwingungsströmen auf einphasigen Netzen ist der Crestfaktor größer als 1,414. Dreiphasige Netze mit überlagerten Oberschwingungsströmen zeigen sehr oft stark verformte Wellenformen. Die einfache Methode zur Bestimmung und Vergleich des Crest-Faktors führt bei diesen komplexen Wellenformen zu keinem verwertbaren Ergebnis.

Nachdem Sie festgestellt haben, dass Oberwellen vorliegen, können Sie mithilfe eines Netz- und Oberschwingungsanalysators wie dem Fluke 43B die Situation genauer analysieren.

Vergleich der Messwertanzeige

Messart	Wandlerprinzip	Messung der Sinusform*	Messung der Rechteckform*	Messung einer verzerrten Signalform*
				
Mittelwertbildung	Gleichgerichteter Mittelwert x 1,1	korrekt	10% zu hoch	Bis zu 50% zu niedrig
Echt-Effektivwertbildung	Effektivwert-Wandler, berechnet das Wärmeäquivalent	korrekt	korrekt	korrekt

*Innerhalb der Spezifikationen des Multimeters für Bandbreite und Crest-Faktor

Problemlösungen

Im Folgenden werden einige Anwendungen zur Lösung der typischen Probleme mit Oberschwingungen aufgezeigt. Für die Durchführung der Messungen am Versorgungsnetz sind die entsprechenden Bestimmungen und Richtlinien über Netzzrückwirkungen für eine gezielte Analyse zu beachten.

Überlastete Neutralleiter

In dreiphasigen Netzen mit vier Leitern verringert sich der 50 Hz-Anteil des Neutralleiterstroms durch gleichmäßige Auslastung der Phasen. Die Oberschwingungen dritter Ordnung können durch Zuschalten von Oberschwingungsfilttern an den Lasten reduziert werden. Sind diese Maßnahmen nicht ausreichend, so ist ein zusätzlicher Neutralleiter zu verlegen. Ein überdimensionierter Neutralleiter erfüllt die gleiche Funktion und kann gemeinsam von den drei Phasen genutzt werden kann.

Reduzierung der Transformatorbelastung

Die Belastung des Transformators durch Oberschwingungen kann durch die Reduzierung der angeschlossenen Last verringert werden. Das strengste Verfahren zur Reduzierung ist in der ANSI/IEEE-Norm C57.110-1986 beschrieben. Es ist hinsichtlich der Handhabung recht aufwändig, da es umfangreiche Daten vom Transformatorhersteller sowie ein vollständiges Oberschwingungsspektrum des Laststroms erfordert.

Die Computer & Business Equipment Manufacturers Association hat ein zweites Verfahren empfohlen, das mehrere direkte Messungen erfordert, die Sie mit handelsüblichen Testgeräten durchführen können. Hiermit ergeben sich vernünftige Ergebnisse für 230-V-Transformatoren, die niederfrequente ungerade Oberschwingungen (dritte, fünfte, siebte) liefern, wie sie typischerweise von Computern und Büromaschinen erzeugt werden, die an einphasigen Abzweigungskreisen betrieben werden.

Lastreduzierungsfaktor

Zu Bestimmung des Lastreduzierungsfaktors ist der Spitzen- und der Echt-Effektivwert der drei Phasen zu messen. Sind die Phasen nicht gleichmäßig belastet, wird der Mittelwert der einzelnen Phasenströme bestimmt und anschließend in die folgende Beziehung eingesetzt:

$$\begin{aligned} \text{THDF} &= \text{Transformer Harmonic Derating Faktor} \\ &= \frac{(1,414)(\text{Echt-Effektiv-Phasenstrom})}{(\text{momentaner Spitzenwert des Phasenstroms})} \end{aligned}$$

Diese Berechnung liefert einen Wert zwischen 0 und 1,0, typischerweise zwischen 0,5 und 0,9. Ist der Phasenstrom rein sinusförmig (unverzerrt), so ist der momentane Spitzenwert 1,414 mal größer als der Echt-Effektivwert und der Reduzierungsfaktor ist gleich 1,0. In diesem Fall ist keine Reduzierung der Last erforderlich.

Sind dem belastetem Netz Oberschwingungen überlagert, ergibt sich die Lastreduzierung für den Transformator aus dem Produkt des kVA-Wertes des Typenschildes und dem Reduzierungsfaktor (THDF).
kVA reduziert = (THDF) x (kVA Typenschild)

Beispiel: 208/120 Y Transformator mit Nennwert 225 kVA:

	Phase	Echt-Effektiv Strom in A in A	Momentaner Stromspitzenwert
Ströme gemessen mit einem Fluke 87 und einer AC-Stromzange 80i-600:	01	410 A	804 A
	02	445 A	892 A
	03	435 A	828 A

$$I_{\text{Phase mittel}} = \frac{410 + 445 + 435}{3} = 430 \text{ A}$$

$$I_{\text{Spitze mittel}} = \frac{804 + 892 + 828}{3} = 841 \text{ A}$$

$$\text{THDF} = \frac{(1,414) (430)}{841} = 72,3 \%$$

Dieser Wert gibt an, mit welcher Last der Transformator bei Oberschwingungen belastet werden darf. Die Belastung des Transformators wird auf 72,3% reduziert, um eine Überhitzung zu vermeiden.

Sicher arbeiten

Die hohen Spannungen und Ströme in Stromversorgungssystemen können zu ernsthaften Verletzungen oder Todesfällen durch Elektroschocks führen. Daher sollten nur geschulte und erfahrene Elektriker, die über Kenntnisse in Bezug auf die elektrische Anlage und das zu testende System verfügen, Messungen und Modifikationen an elektrischen Systemen durchführen.

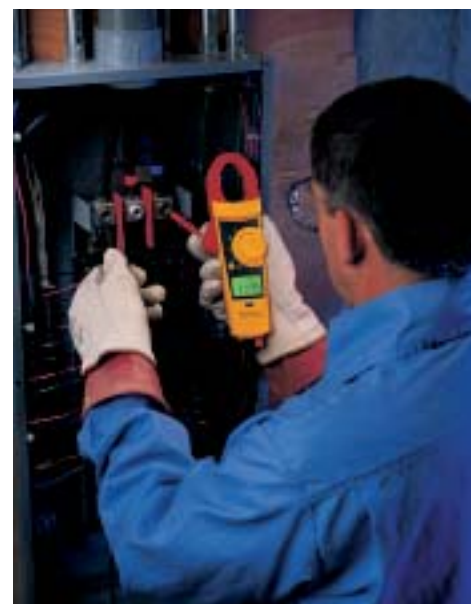
Fluke kann nicht alle möglichen Vorsichtsmaßnahmen voraussehen, die Sie bei der Durchführung der hier beschriebenen Messungen treffen sollten. Sie sollten jedoch mindestens die folgenden Punkte beachten:

- Benutzen Sie eine geeignete Sicherheitsausrüstung, wie Schutzbrillen, isolierte Handschuhe, Isoliermatten usw.
- Achten Sie darauf, dass die Stromversorgung komplett ausgeschaltet und gegen versehentliches Einschalten gesichert und entsprechend gekennzeichnet wurde,

wenn Sie bei Messungen in direkten Kontakt mit Schaltungskomponenten kommen. Vergewissern Sie sich, dass die Stromversorgung von niemand anderem als von Ihnen eingeschaltet werden kann.

- Lesen Sie die Handbücher der verwendeten Instrumente durch, bevor Sie die in diesem Anwendungsbericht enthaltenen Informationen in der Praxis nutzen. Achten Sie besonders auf alle Sicherheits- und Warnhinweise in den Handbüchern.

Dieser Artikel ist eine allgemeine Anleitung zum Verstehen von Oberschwingungen. Er ist kein Ersatz für die Dienste eines professionellen Beraters für elektrische Systeme. Bevor Sie Messungen vornehmen, um Ihre potenziellen Probleme mit Oberschwingungen zu diagnostizieren oder zu beheben, sollten Sie Ihre Anlage durch einen professionellen Elektrotechniker analysieren lassen.



Messungen aus der Praxis

Problembeschreibung

In modernen Bürogebäuden sind häufig eine große Anzahl von Computern und anderen Bürogeräten installiert. Diese elektronischen Lasten werden von einem Niederspannungs-Transformator (primär in Dreieck- und sekundär in Sternschaltung) versorgt. Die installierten PCs sind gleichmäßig über das gesamte Gebäude verteilt. Mit Ausnahme eines Raumes, in dem sich eine große Anzahl unterschiedlicher Rechner befindet. Die PCs in diesem Raum werden von getrennten Stromkreisen versorgt.

Der Transformator und der Hauptschalter befinden sich in einem eigenen Raum für elektrische Anlagen im Untergeschoss. Eine Inspektion dieses Raumes gibt unmittelbar zwei wichtige Hinweise für vorhandene Oberschwingungsströme:

- Der Transformator zeigt eine übermäßige Wärmeentwicklung.
- Die Hauptverteilung erzeugt ein deutlich hörbares Brummgeräusch, welches sich vom gewöhnlichen Schnarren oder Prellen eines

defekten Sicherungsautomaten unterscheidet. Das Geräusch ist durch einen tiefen Brummton gekennzeichnet, der durch Vibrationen innerhalb der Verteilung entsteht.

Eine Belüftung direkt über dem Transformator sorgt für den Abzug der Warmluft und verhindert eine extreme Erhöhung der Raumtemperatur.

Erkennen des Problems

Die Transformatorströme (siehe Tabelle 1) wurden bestimmt mit einem Echt-Effektivwert und einem mittelwertanzeigenden Messgerät am Neutralleiter und den drei Phasen der Sekundärseite. Zur Messung der hohen Ströme wurden Messgeräte mit einer 600 A Strommesszange benutzt. Abbildung 4 and 5 zeigen die Wellenformen der gemessenen Ströme.

Leiter	Echt-Effektiv-Wert Messgerät	Mittelwert-Anzeigendes Messgerät	Momentaner Spitzenwert des Stromes
Phase 1	410	328	804
Phase 2	445	346	892
Phase 3	435	355	828
Neutralleiter	548	537	762

Tabelle 1. Transformatorströme

Der Vergleich der Phasenströme mit dem Strom des Neutralleiters weist auf die Überlagerung von Oberschwingungsströmen hin. Wie Tabelle 1 zeigt, ist der Neutralleiterstrom wesentlich größer als ein einzelner Phasenstrom, obwohl die Phasen nahezu gleichmäßig belastet sind. Die Messungen mit mittelwertbildenden Messgeräten ergeben etwa einen 20% niedrigeren Messwert für alle Phasenströme und einen etwa 2% kleineren Wert für den Neutralleiterstrom.

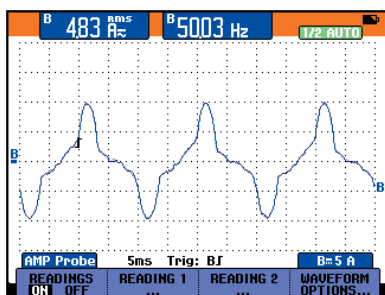


Abbildung 4. Phasenstrom

Die abgebildeten Wellenformen zeigen deutlich die Ursache für diese Differenz. Der Phasenstrom ist erheblich durch die Überlagerung mit Oberschwingungen dritter Ordnung verzerrt, im Gegensatz zum annähernd sinusförmigen Neutralleiterstrom, der aus der nahezu sinusförmigen Oberschwingung der dritten Ordnung besteht. Die gemessenen Phasenströme in Tabelle 1 zeigen deutlich die Notwendigkeit der Messung des Echt-Effektivwertes, um den Oberschwingungsstrom genau zu bestimmen.

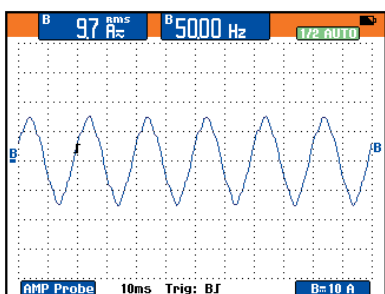


Abbildung 5. Strom im Neutralleiter

Der nächste Schritt bestand darin, den "Oberschwingungs-Reduktionsfaktor" oder THDF zu berechnen (siehe Abschnitt "Reduzierung der Transformatorbelastung" auf Seite 6).

Der ermittelte Wert reduziert die Belastung des Transformators auf 72,3% seiner angegebenen Nennleistung, um eine Überlastung und übermäßige Erwärmung zu verhindern. In diesem Beispiel ist die Belastung auf 72,3 % des Nennwertes von 225 kVA zu verringern, d.h. auf 162,7 kVA. Als momentane Belastung wurden 151,3 kVA ermittelt. Obwohl dieser Lastwert weit unterhalb der auf dem Leistungsschild angegebenen Nennlast liegt, wird der Transformator durch den Anteil der Oberschwingungen nahe der reduzierten Last betrieben.

Unterverteilungen: In der Unterverteilung der verzweigenden Stromkreise für die 230-V-Steckdosen wurden die Ströme jedes Neutralleiters gemessen (siehe Tabelle 2).

Neutralleiter	Strom in A
01	5.0
02	11.3
03	5.0
04	13.1
05	12.4
06	15.0
07	1.8
08	11.7
09	4.5
10	11.8
11	9.6
12	11.5
13	11.3
14	6.7
15	7.0
16	2.3
17	2.6

Tabelle 2. Neutralleiterströme der einzelnen Stromkreise

Zu beachten ist, dass jeder gemessene Strom dieser einzelnen Stromkreise erheblich kleiner als 15 A ist. In jedem Stromkreis liegt jedoch zwischen Neutralleiter und Erdung eine erhebliche Spannung an.

In den verzweigten Stromkreisen tritt der gleiche Effekt auf wie zuvor beim Netztransformator. Der Neutralleiterstrom ist erheblich größer als ein zugehöriger Phasenstrom. Die Gefahr einer Überlastung des Neutralleiters besteht, da kein Schutz durch eine Sicherung vorgesehen ist.

Empfehlungen

1. Keine zusätzlichen Lasten an den versorgenden Transformator anschließen, ohne die sich addierenden Oberschwingungen erheblich zu reduzieren.
2. Verlegung eines zusätzlichen Neutralleiters zu den hochbelasteten Stromkreisen.
3. Exakte Überwachung der Lastströme durch Verwendung von Echt-Effektivwert Messgeräten.

Leiter	Strom in A Echt-Effektivwert- Messgerät	Momentaner Spitzenwert des Stromes
25	7.8	3.75 V
27	9.7	4.00 V
29	13.5	8.05 V

Tabelle 3. Transformatorströme

Fluke. Damit Ihre Welt intakt bleibt.

Fluke Deutschland GmbH
Heinrich-Hertz-Straße 11
34123 Kassel
Tel.: (069) 2 22 22 02 00
Fax: (069) 2 22 22 02 01
E-Mail: info@de.fluke.nl
Internet: www.fluke.de

Fluke Vertriebsgesellschaft m.b.H.
Mariahilfer Straße 123
1060 Wien
Tel.: (01) 928 95 00
Fax: (01) 928 95 01
E-Mail: info@as.fluke.nl
Internet: www.fluke.at

Fluke Switzerland AG
Industrial Division
Grindelstrasse 5
8304 Wallisellen
Tel.: (01) 580 75 00
Fax: (01) 580 75 01
E-Mail: info@ch.fluke.nl
Internet: www.fluke.ch

Besuchen Sie uns im Internet - auf den Websites in Landessprachen oder der internationalen Website <http://www.fluke.com>