



## Eine Erstinformation für nicht Elektrotechniker Harmonische Verzerrung in elektrischen Systemen

Die Nachfrage nach geringerem Energie-Verbrauch bei HLK-Systemen und anderen elektrisch angetriebenen Komponenten (Frequenzumformer, Gleichrichter, Wechselrichter, Schaltnetzgeräten, LED-Treiber) hat zur Einführung des Begriffs „nicht lineare Lasten“ in elektrischen Netzwerken geführt.

Harmonische Verzerrungen werden durch nicht lineare elektrische Lasten verursacht und sind vermehrt ein großes Thema bei elektrischen Systemen in Gebäuden.

Dieser Newsletter liefert sehr vereinfachte Erklärungen, was Harmonische Verzerrungen sind, wie diese entstehen und wodurch diese verursacht werden. Dieser Newsletter ist an Ingenieure mit geringem elektrotechnischem Hintergrund gerichtet.

Der Begriff „Harmonische“ (Oberwelle) wird verwendet, um die Verzerrungen der grundlegenden Spannungs- oder Stromkurvenform (der Grundwelle) zu beschreiben. Die Kurvenform, im idealsten Fall ist es eine reine Sinuswelle, wird vom Generator des Energieversorgungsunternehmens (EVU) erzeugt.

Es ist ein mathematischer Weg, die Verzerrung von elektrischen Wellen praktisch zu beschreiben sowie die potentiellen und realen Probleme des immer intensiver werdenden Einsatzes von Energiespargeräten (FUs, LEDs; etc.) greifbar zu machen.

### Starten wir mit Grundlagen

Bevor wir über Verzerrungen sprechen, erinnern wir uns: „Was wird verzerrt?“

Verzerrungen können in jedem elektrischen System entstehen, unabhängig davon, wie die Leistung dem System zugeführt wird.

Nehmen wir an, die elektrische Leistung wird über das elektrische Netz einem Gebäude zugeführt. Die Einflüsse von „Vor-Ort-Generatoren“ verursachten Oberwellen und den damit verbundenen besonderen Problemen wurde bereits in einem früheren Newsletter „Wie FU's die Dimensionierung der Stromaggregate beeinflussen - Volume 35-1“ diskutiert.

Gebäude werden in den meisten Fällen durch das EVU über das elektrische Verteilernetz versorgt. Diese Gebäude werden über Leitungen mit elektrischer Energie versorgt und sind so quasi miteinander verbunden.

Die Schlüsselgrößen im Netz sind: Spannung, Strom und Frequenz.

Die Spannung wird durch den Transformator bestimmt. Die Spannung auf der Sekundärseite des Transformators verbleibt relativ konstant, jedoch gibt es Faktoren, welche kurzfristig Einfluss auf die mittlere Spannung, die Spannungskonstanz, haben.

Der Strom oder die Stromhöhe hängt von der Versorgungsspannung und dem aktuellen Verbrauch von elektrischen Lasten im Gebäude ab. Wenn die elektrische Last in einem Gebäude steigt, steigt auch die Höhe des Stromflusses.

Die Leistung ist die Multiplikation aus Strom, Spannung und dem Leistungsfaktor ( $\cos \phi$ ) sowie einem Faktor für Ein- und Dreiphasenwechselstrom. Diese Multiplikation beschreibt die nutzbare Leistung (Wirkleistung) im Gebäude.

Die Frequenz ist abhängig vom Land. Die USA und einige andere Länder verwenden 60Hz. In Europa beträgt die Frequenz 50 Hz, d.h. die Spannung oder der Strom schwingt 50 mal pro Sekunde. In einem elektrischen Verteilernetz eines EVUs muss die Frequenz mit sehr engen Toleranzen gleich bleiben und im Idealfall wird das Gebäude mit einem sinusförmigen Signal mit 50 Hz oder 60 Hz versorgt.

Diese grundlegende Frequenz nennt man „Grundwelle“ und ist der Kurvenform nach idealerweise ein reiner Sinus mit 50 Hz.

Die Frequenz soll und muss gleich bleiben, auch dann, wenn Strom und Spannung im Gebäude variieren.

Abbildung 1: zeigt eine 50 Hz sinusförmige Grundwelle. Diese periodische Kurvenform wiederholt sich immer und immer wieder auf natürlicher Weise. Auf der x- Achse befindet sich die Zeit. Bei 50 Hz sind dies 50 Schwingungen / Sekunde. Die Periodendauer (= Zeit einer Schwingung) ist  $1/50 = 0,02$  Sekunden.

Abbildung 1: 50 Hz periodische und sinusförmige Grundwelle

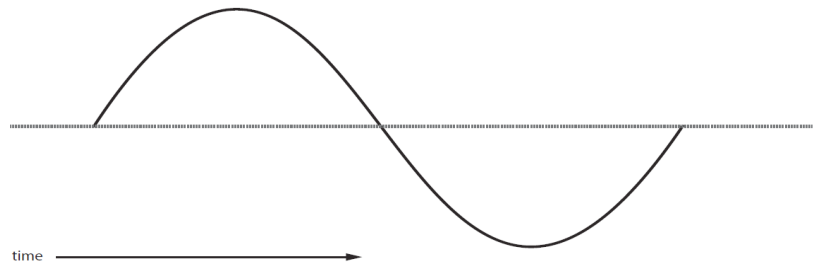


Abbildung 2: zeigt zwei Sinuswellen. Deutlich zu erkennen ist das periodische Verhalten. Neben der Zeit kann die Periodendauer auch als Winkel dargestellt werden. 360 Grad entsprechen einer ganzen Welle. Auf der y-Achse sind die Amplituden Momentanwerte. Die Periodendauer wird bei den Amplituden-Maximalwerten gemessen. Einfacher ist jedoch die 0-Durchgänge als Bezug zu nehmen.

Abbildung 2: zwei Sinuswellen. Die Anzahl von kompletten Zyklen pro Sekunde ist die Frequenz

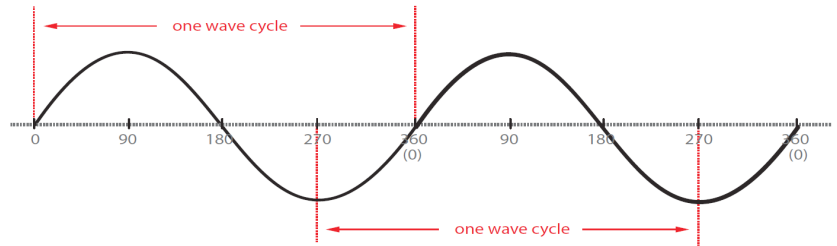
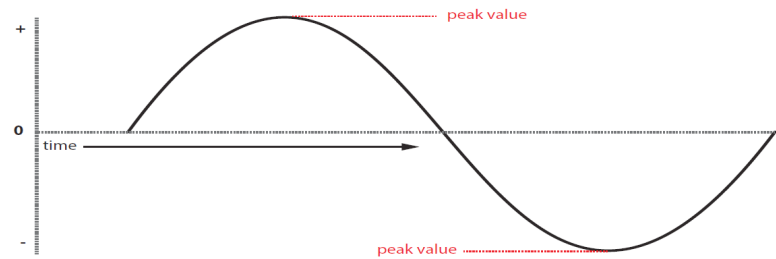


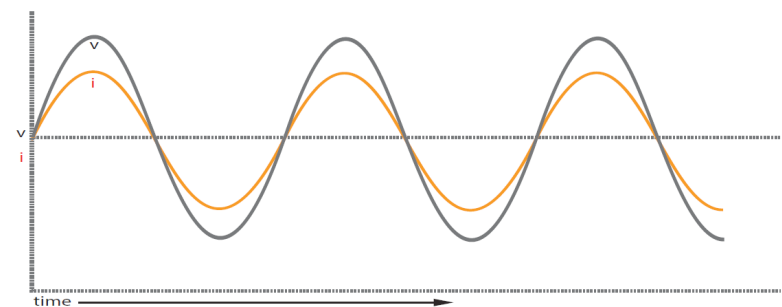
Abbildung 3: Wechselstrom (Alternating Current, AC) bedeutet, dass der Strom zwischen den beiden positiven und negativen Amplituden-Maximalwert hin und her schwingt. Gleiches gilt für die Spannung.

Abbildung 3: Wechselstrom, alternierendes Schwingen zwischen positiven und negativen Maximum



Um die realen Zusammenhänge zwischen Leistung, Strom und Spannung grundlegend zu verstehen, ist folgendes besonders wichtig. Die Frequenz und die Spannung werden vom EVU bestimmt. Das Stromsignal ist aber abhängig von der elektrischen Last. Diese ist wiederum abhängig von der Type der Last (induktiv oder kapazitiv). In den Zusammenhängen zwischen Spannung, Strom und Last liegt der Schlüssel zum Verständnis.

Abbildung 4: Spannung u und Strom i bei rein ohmscher Last, keine Phasenverschiebung



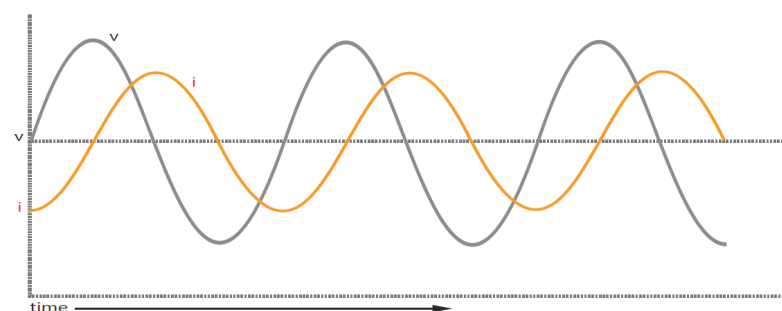
### Lasttypen

Lineare Lasten treiben den Strom mit gleichem Verhältnis zur Spannung. Der Widerstand (oder die Impedanz) ist linear und gleichbleibend. Die sinusförmige Wellenform bleibt intakt.

Es gibt drei Arten von linearen Lasten. Wir beginnen mit ohmschen Lasten: Elektrische Heizstäbe sind ein Beispiel. Bei ohmschen Lasten gibt es keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. 0-Durchgänge für Strom und Spannung sind an der gleichen Stelle. Siehe Abbildung 4:

Abbildung 5: Induktive Last, der Strom i eilt der Spannung u nach -> Phasenverschiebung

Induktive Lasten, z.B. Motoren, Transformatoren. Der Strom ist zur Spannung verschoben, er eilt der Spannung nach. Die Spannung u erreicht bereits im Schnittpunkt der x und y den 0-Durchgang, der Strom i jedoch etwas später. Siehe Abbildung 5: Phasenverschiebung zwischen der Spannung u und dem Strom i.



Die dritte Form von linearen Lasten sind kapazitive Lasten, z.B. elektrische Kondensatoren, Batterien oder EVG –Leuchtstoffröhren. Bei kapazitiven Verbrauchern eilt der Strom der Spannung voraus. In der Praxis haben wenige Verbraucher ausgeprägte kapazitive Anteile. In Gebäuden findet man meist Verbraucher mit hohem induktivem Anteil. Deshalb kommen bei Kompensationsanlagen elektrische Kondensatoren zum Einsatz, um den induktiven Anteil von Transformatoren, Motoren, etc. auszugleichen. Wenn die Spannung und der Strom zur gleichen Zeit den 0-Durchgang haben, handelt es sich um Ohm'sche Verbraucher. In diesem Fall ist die Leistung, das ist das Produkt der Momentanwerte aus Spannung und Strom, immer positiv, weil zwei Werte, mit negativen Vorzeichen multipliziert, ebenfalls ein positives Ergebnis liefern.

Siehe Abbildung 6:

Wenn es sich um induktive oder kapazitive Verbraucher handelt, dann eilt der Strom der Spannung nach oder vor. Dann ist die Leistungskurve in einigen Bereichen negativ.

Siehe Abbildung 7:.

Es gibt Bereiche, in welchen die Spannung noch positiv aber der Strom schon negativ ist. Dann ist die Multiplikation zwischen Strom und Spannung negativ (siehe Leistungskurve in Abbildung 7 zwischen  $150^\circ$  und  $180^\circ$ ). Da der negative Anteil ungenutzt zum Kraftwerk zurückfließt und keine Arbeit verrichten kann, spricht man von Blindleistung. Die zeitliche Verschiebung zwischen Strom und Spannung wird Phasenverschiebung oder  $\cos \phi$  oder Leistungsfaktor genannt. Dieser Faktor kann auch aus der Wirkleistung dividiert durch die Scheinleistung errechnet werden. Die Scheinleistung ist jene Leistung, als wäre die Last rein Ohm'scher Natur, was aber eigentlich so gut wie nie der Fall ist, und wird in kVA gemessen. Die Wirkleistung wird in kW gemessen.

Wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung hoch ist, fließt der nicht nutzbare Strom, der Blindstrom, zurück zum Generator des EVU's. Das EVU muss mehr liefern, um den Blindstrom zu kompensieren. Das belastet die Leitungen des Stromnetzes und erhöht zusätzlich die Netzverluste.

Bis jetzt wurde nur das Thema lineare elektrische Lasten behandelt.

Für die weitere Betrachtung ist der Einfluss von Blindstrom, welcher keine Arbeit verrichten kann, für das Verständnis der weiteren Überlegungen besonders von Bedeutung und essenziell.

Abbildung 6: Ohm'sche Lasten haben keine Phasenverschiebung, es handelt sich immer um Wirkleistung

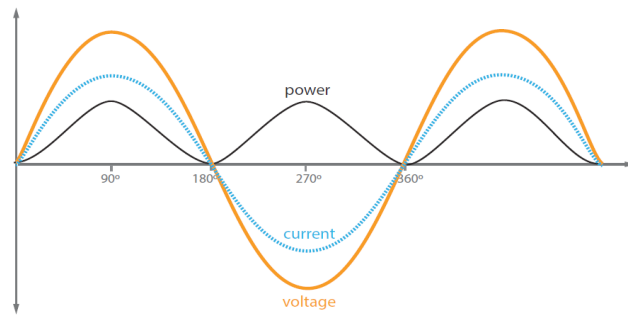
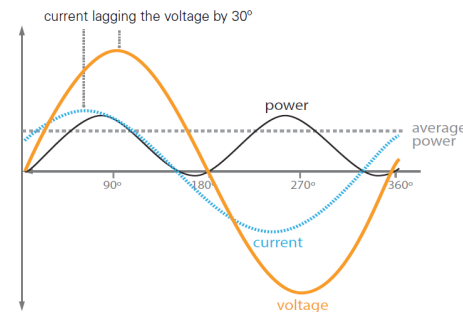


Abbildung 7: der Strom eilt der Spannung um 30 Grad (Phasenverschiebung) vor -> kapazitive Last



Für "Nicht-Elektrotechniker" ist dieser Zusammenhang mitunter schwer zu verstehen. Zum besseren Verständnis kann man sich Induktivitäten (elektrische Wicklungen) oder Kapazitäten (elektrische Kondensatoren) als kurzzeitige und natürliche Energiespeicher vorstellen. Induktivitäten sind Strom- und Kapazitäten sind Spannungsspeicher. Eine induktive Last (z.B. ein Motor oder ein Transformator) speichert den Strom, wenn die Spannung das positive oder negative Maximum erreicht. Wenn die Spannung erneut gegen dem 0-Durchgang zustrebt, dann fließt der Strom etwas zeitverzögert wieder zurück ins Verteilernetz - der Strom eilt nach. Ein elektrischer Kondensator (oder eine Batterie) sind kapazitive Lasten und regieren umgekehrt. Um den Kondensator (oder die Batterie) zu laden, muss zuerst ein Strom fließen. Die maximale Höhe der positiven oder negativen Spannung wird erst zeitverzögert erreicht - der Strom eilt vor. In beiden Fällen kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung zwischen der Spannungs- und der Stromwelle. Das führt dazu, dass das Produkt der Momentanwerte aus Spannung und Strom, was letztendlich die Leistung darstellt, zeitweise negativ ist.

Diese nicht nutzbare Leistung nennt man Blindleistung. Der Flächenteil unterhalb der 0-Linie repräsentiert die nicht nutzbare Energie, welche über das Netz wieder zurück zum Kraftwerk fließt. Den anteiligen Strom der Blindleistung nennt man Blindstrom. Das ist der Grund, warum dieser Blindstrom keine wirksame Arbeit verrichten kann. Das EVU muss jedoch mehr Energie erzeugen, um die nicht nutzbare Leistung (Energie) zu kompensieren. Dieser Blindstrom belastet zudem die elektrischen Leitungen und verursacht Leitungsverluste, sowohl im Netz, als auch im Gebäude.

Nicht-lineare Lasten verzerren zudem die ursprüngliche Kurvenform von Strom und Spannung, indem der augenblicklich aufgenommene Strom pulsartig und unverhältnismäßig auf die Spannung rückwirkt. Schaltnetzgeräte in Computer, Servern, Monitoren, Druckern, Kopierern, Radio- und TV-Geräten, Ladegeräten, Netzwerk-Routern und Switches, sowie Frequenzumformer, Gleich- und Wechselrichter oder LED Treiber sind nur einige Beispiele für nicht-lineare Geräte (Verbraucher = Lasten).

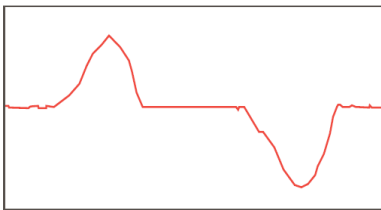
Bei kleinen Verbrauchern in Gewerbe, Büro und Heim sind dies einphasige nicht-lineare Verbraucher. Große Verbraucher sind in der Regel dreiphasige nicht-lineare Verbraucher.

Bei nicht-linearen elektrischen Verbrauchern ist der Widerstand nicht konstant. Dieser variiert mit dem Kurvenverlauf der angelegten Spannung. Das bewirkt, dass die resultierende Kurvenform des Stromes keine Ähnlichkeit mehr mit der Kurvenform der Spannung aufweist. Jeder von den vielen nicht-linearen Verbrauchern hat eine einzigartige Widerstandscharakteristik und deshalb seine eigene und spezielle Stromkurvenform.

Typische Schaltnetzgeräte weisen in einem Zyklus (360°) zwei pulsierende Halbwellen auf. Diese entstehen durch die Umwandlung von Wechsel- auf Gleichstrom (AC auf DC). Dies wird mit einem Gleichrichter und einem nachgeschalteten Kondensator realisiert. Derartige Verbraucher treiben einen Strom, welcher nur um das positive und negative Maximum hohe Amplitudenpulse aufweisen.

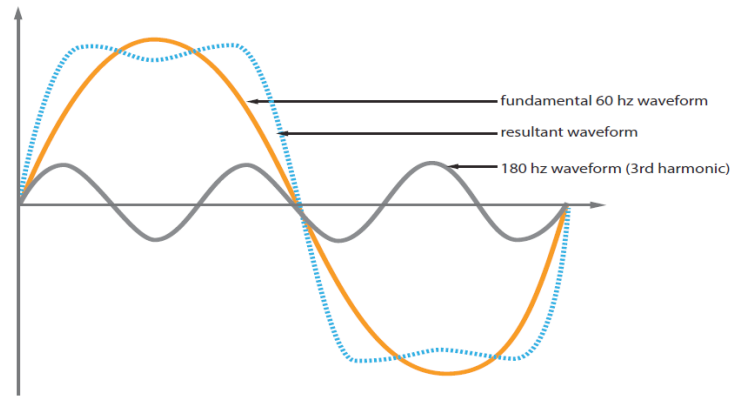
Siehe Abbildung 8:

*typ. Wellenverlauf des Stroms von einem Schaltnetzgerät*



Die Umwandlung von Wechselstrom (AC) auf Gleichstrom (DC) erzeugt „Harmonische“, welche auch Oberwellen genannt werden. Der Gleichrichter konvertiert von AC auf DC, indem dieser Teil der ursprünglichen sinusförmigen Welle schnell ein- und ausschaltet. Teile der ursprünglichen Welle werden quasi abgeschnitten. Das zyklische Ein- und Ausschalten zerstört und verzerrt die ursprüngliche sinusförmige Wellenform, diese wird regelrecht „zerhackt“. Es entsteht eine neue Wellenform, welche sich durch die Aufsummierung von sehr vielen einzelnen Oberwellen bildet. Jede einzelne Oberwelle hat eine vielfache Frequenz der ursprünglichen Sinuswelle, der Grundwelle. Diese „harmonische Verzerrung“ wirkt sich auch auf das gesamte Netz aus. Diese Beeinflussung auf das Netz bezeichnet man als Netzrückwirkung. Obwohl das Schaltnetzgerät mit einer sinusförmigen 50-Hz-Spannung versorgt wird, sieht die resultierende Stromkurvenform (Abbildung 8) gänzlich anders aus. Die neue resultierende Kurvenform kann mathematisch durch das Aufsummieren der Grundwellen mit vielen Oberwellen und vielen und mannigfachen Frequenzen beschrieben werden.

Abbildung 9. Resultierende Summenwelle aus Addition der Grundwelle und der 3. Harmonischen (Oberwelle)



Zum besseren Verständnis, ist es notwendig zu erkennen, wie Sinuswellen addiert werden.

Harmonische - Wie vorhin erwähnt, weist das Vorhandensein von Harmonischen darauf hin, dass Strom und Spannung verzerrt sind. D.h. die Kurvenformen sind nicht mehr sinusförmig.

Um dies zu demonstrieren, starten wir mit einer 60-Hz-Sinuswelle (Grundwelle) und addieren eine weitere Welle mit der dreifachen Frequenz hinzu. Dies ist die 3. Harmonische oder die 3. Oberwelle. Die Abbildung 9 zeigt die Grundwelle in orange und die 3. Oberwelle in grau. Die blaue resultierende Kurve ist das Ergebnis der Aufsummierung der Momentanwerte. Auf gleicher Weise könnte man dies auch mit einer 50-Hz-Sinuswelle zeigen.

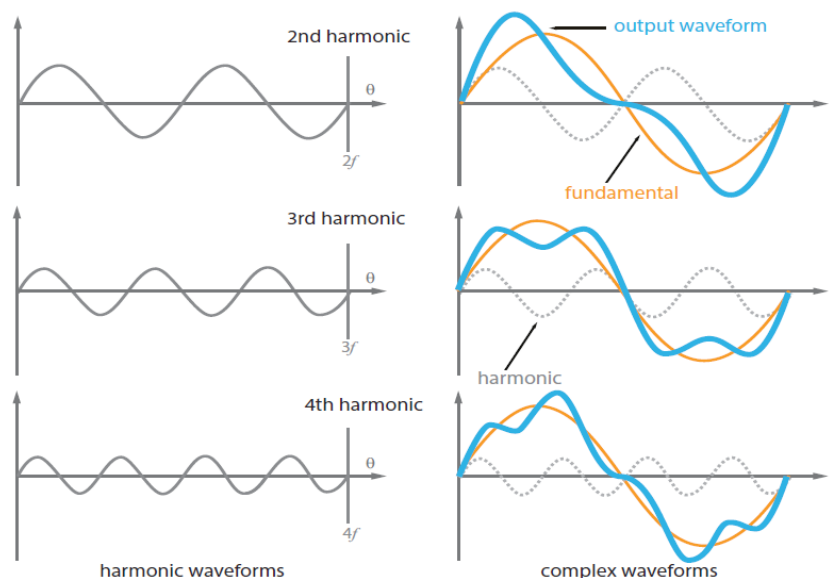
Als Ergebnis erhält man die „Sattelkurve“.

Wenn beide Momentanwerte das gleiche Vorzeichen ausweisen, addieren sich die Amplitudenwerte. Wenn die Vorzeichen der Momentanwerte unterschiedlich sind, subtrahieren sich die Amplitudenwerte. So ergibt sich die blaue Summenkurve.

Die Oberwellenfrequenzen sind immer ein ganzzahliges Vielfaches der Grundwellenfrequenz. Die Abbildung 10 zeigt die resultierende Kurvenform, Grundwelle jeweils addiert mit der 2., 3., und 4. Oberwelle.

Die Abbildung 9 & 10 zeigen die Addition von nur einer Harmonischen. In der Praxis hat man es aber mit sehr vielen Oberwellen zu tun, welche auf gleicher Weise zu addieren wären.

Abbildung 10. Resultierende Kurvenformen durch Addition der Grundwelle mit der 2., 3. & 4. Harmonischen



Um komplexe Wellenformen, die von nicht-linearen Verbrauchern herrühren, mathematisch beschreiben zu können, sind mitunter sehr viele Harmonische (Oberwellen) erforderlich.

Die Abbildung 11 zeigt die Addition der ungeraden 3. bis zur 15. Oberwelle zur Grundwelle. Als Resultierende erhält man eine nahezu rechteckige Wellenform.

Mehr zur Phasenverschiebung - cosf:

In den vorherigen Überlegungen wurde bei elektrisch linearen Verbrauchern der Einfluss der Phasenverschiebung  $\cos f$  behandelt. Der  $\cos f$  beschreibt, wie viel nicht nutzbarer Strom durch einen linearen Verbraucher generiert wird.

Gleichermaßen erzeugen nicht-lineare Verbraucher ebenfalls nicht nutzbare Ströme. Diese Verzerrung des Blindstroms wird durch den „Grundschwingungsgehalt“, dem Verzerrungsfaktor, beschrieben. Dieser ist vergleichbar mit dem Klirrfaktor von HiFi-Systemen.

Die totale und tatsächliche Verzerrung eines elektrischen Systems ergibt sich also aus der Phasenverschiebung und dem Verzerrungsfaktor – dies wird als „totaler Leistungsfaktor“ ausgedrückt.

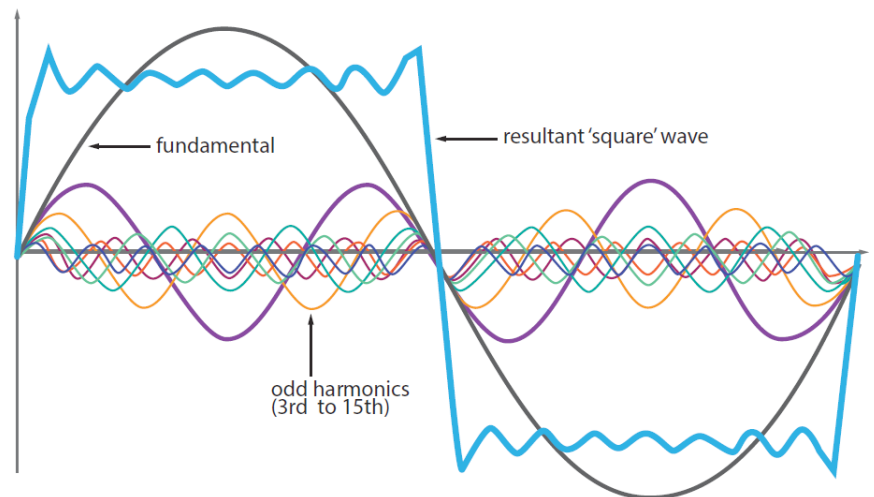
Die nicht nutzbaren Ströme verursachen Kosten bei den EVU's. Dies ist auch der Grund, warum EVU's zu niedrige Leistungsfaktoren pönalisieren. Je nach EVU und Markt können Zuschläge von bis zu 16% durch das EVU verrechnet werden.

Wenn ein EVU niedrige Leistungsfaktoren verrechnet, sind das direkte Kosten, welche durch Harmonische (Verzerrungen) verursacht werden.

Harmonische Ströme wandern also gemeinsam mit den Grundwellen durch unsere elektrische Systeme und Netze. Oft ist es so, dass dies keine Probleme verursacht, weil die Systeme ausreichend tolerant sind.

Sollte der Einfluss von Harmonischen aber zu exzessiv werden, kommt es zu mannigfachen Problemen, wie z. B.:  
Überhitzung von Leitungen, Ausfall von sensitiven Komponenten, Interferenzen mit der Regelung & Telekommunikation, Verzerrung der Spannung (verursacht durch den Einfluss von Harmonischen des Stroms), Schäden an mechanischen Lagern von Motoren und Ventilatoren, ungewolltes Auslösen von FI-Schaltern, etc.

Abbildung 11: Rechteck-Welle, Summe aus Grundwelle und der ungeraden 3. bis 15. Harmonischen



## Vergleich: Phasenverschiebung und Verzerrungsfaktor

### Lineare Lasten - $\cos f$

- Lineare Verbraucher ändern nicht die sinusförmige Kurvenform des Stromes, können aber die Phasen-lage zwischen Strom und Spannung verschieben.
- Bei linearen Verbrauchern ist es bei induktiven Lasten (z.B. Motoren) möglich, die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom durch das Zuschalten von Kondensatoren zu kompensieren.
- Bei linearen Verbrauchern zeigen die Spannung und der Strom immer eine sinusförmige Wellenform, mit nur einer Frequenz, also nur die Grundwelle und ohne Oberwellen.

### Nicht-lineare Last - Verzerrungsfaktor

- Nicht-lineare Verbraucher treiben einen puls förmigen Strom. Die Pulsation kann ein Vielfaches der Netzfrequenz (50Hz, 60Hz) betragen.
- Nicht-lineare Verbraucher erzeugen Ströme mit hohem Oberwellengehalt. Die Oberwellen können ein Vielfaches der Netzfrequenz erreichen und addieren sich zur 50 oder 60 Hz Grundwelle.
- Der Verzerrungsfaktor kann durch geeignete Filter korrigiert werden. Diese Filter sind so ausgelegt, dass nur tiefe Netzfrequenzen (50 Hz, 60 Hz) den Verbraucher „passieren“ können – diese Filter nennt man „Tiefpassfilter“. Damit werden die Oberwellen reduziert, und der nicht-lineare Verbraucher zeigt damit ein „quasi lineares“ Verhalten.
- Der Verzerrungsfaktor ist ein Maß, wie stark sich die harmonische Verzerrung eines nicht-linearen Verbrauchers auf die Effizienz der Leistungsübertragung auswirkt.

## Messung der Oberwellen

In den heutigen modernen Gebäuden gibt es viele verschiedene Arten von nicht-linearen elektrischen Verbrauchern. Die Wellenform des Stroms von jedem einzelnen nicht-linearen Verbraucher ist unterschiedlich und hat seinen eigenen und individuellen Oberwellengehalt.

Ein Weg, den Oberwellengehalt darzustellen, wird in Abbildung 12 gezeigt. Die Amplitudenwerte der Grundwellen und der Oberwellen werden in Prozent angegeben. Die Frequenzen der Oberwellen sind immer ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz (50 oder 60 Hz).

Die Abbildung 12 zeigt die typischen Harmonischen eines Schaltnetzgerätes oder 6-pulse-Frequenzumformers. Die fehlenden Harmonischen werden nicht dargestellt, weil deren Amplitude 0 ist und somit keinen Beitrag zur Verzerrung leisten.

Es ist typisch, dass die einzelnen Amplituden mit steigender Frequenz abnehmen. Daher werden Oberwellen mit hoher Frequenz oft ignoriert, da diese keinen nennenswerten Einfluss auf die Verzerrung haben.

Es gibt verschiedene Kriterien, um die Verzerrungen durch Harmonische bestimm- und messbar zu machen. Sehr häufig kommt der THD-Wert zur Anwendung.

Total Harmonic Distortion (THD) ist ein Maß für die gesamte harmonische Verzerrung. THD kann entweder für den Strom oder für die Spannung berechnet werden. In den meisten Fällen wird damit die harmonische Verzerrung der Spannung beschrieben.

THD ist die Summe der quadratischen Mittelwerte der harmonischen Effektivwerte dividiert durch den Effektivwert der Grundwelle. Die Formel lautet:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2}}{M_1}$$

Wobei:  
 $M_h$  = individueller harmonischer Effektivwert  
 $M_1$  = Effektivwert der Grundwelle  
 $M$  kann entweder Spannung oder Strom sein

Je geringer der THD-Wert ist, umso geringer ist die Verzerrungsblindleistung, jene Blindleistung, welche durch die Verzerrung von nicht-linearen Verbrauchern, wie zum Beispiel Schaltnetzgeräte, Gleichrichter, Wechselrichter, Frequenzumformer, Dimmer, Phasenanschnittsregler und LED verursacht werden.

Kleine Verbraucher mit geringen Strömen können einen hohen THD-Wert aufweisen, was aber irreführend ist, weil diese vor allem im Teillastbetrieb keinen signifikanten Einfluss haben, wie dies z.B. bei Frequenzrichter der Fall ist. Wie vorhin erwähnt, kann die Verzerrung des Stroms sogar eine Verzerrung der Spannung bewirken. Diesbezüglich gibt es ein ähnliches Maß für den Strom, welches als Total Demand Distortion (TDD) bezeichnet wird.

TDD liefert eine bessere Erkenntnis in Bezug auf den Strom, weil der quadratische Mittelwert der Harmonischen des Stroms in Prozent des maximalen Vollaststroms ausgedrückt wird. Die Formel lautet:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} * 100[\%]$$

In den meisten Fällen ist es nicht wichtig, die Details der beiden Formeln zu kennen, aber es ist wichtig, zwischen der Verzerrung der Spannung und des Stromes unterscheiden zu können.

In der Praxis werden die Grund- und Oberwellen für Spannung und Strom mit einem „Power-Analyzer“ gemessen. Dieser zeigt Details über den Oberwellengehalt und berechnet den THD-Wert eines elektrischen Systems.

### Was ist zuviel?

Kommt es zu Problemen mit Harmonischen, ist diese Frage nur schwer zu beantworten. Die Berechnung von THD und TDD eines Systems in der Planungsphase ist sehr kompliziert sowie aufwendig, erfordert viele Informationen und Details über das elektrische System und den darin installierten nicht-linearen Lasten.

Die Liste der potentiellen Probleme, welche durch harmonische Verzerrung verursacht werden könnten, ist lange. Zu erwähnen wäre jedoch, dass in vielen Fällen Harmonische in elektrischen Systemen keine Probleme verursachen.

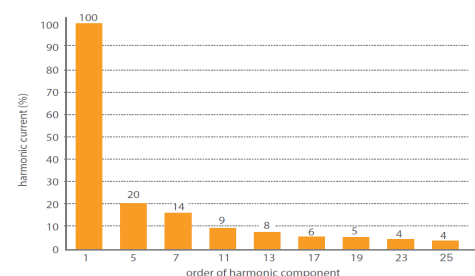
Die potentiellen Probleme basieren auf dem Grad der harmonischen Verzerrung, die Dimensionierung des elektrischen Systems sowie der Empfindlichkeit von installierten Geräten gegenüber Oberwellen.

Wenn der Anteil von nicht-linearen Lasten nur einen geringen Anteil ausmachen (weniger als 20%), dann ist das potentielle Risiko sehr gering. Aber immer mehr nicht-lineare Verbraucher kommen zur Anwendung und sind im Netz zu finden. Damit steigt das Risiko von Problemen, welche in einem Zusammenhang mit einem zu hohen Oberwellengehalt in Verbindung gebracht werden können.

Es ist so, als würde man Kieselsteine in die Mitte eines Teichs werfen, welche dann Wellen erzeugen. Ist der Teich groß, verlieren sich die Wellen in der Größe des Teichs und lösen sich auf. In einem kleinen Teich erreichen die Wellen das Ufer, werden wie ein Echo reflektiert und hinterlassen ein Chaos von sich gegenseitig beeinflussenden Wellen.

Ähnlich verhält sich auch das elektrische Netz. Die Größe des Verteilungsnetzes und die „Steifheit“ oder „Nachgiebigkeit“ des elektrischen Systems beeinflussen den Grad, ab wann Oberwellen Gerätschaften und Verbraucher beeinträchtigen. Ein großes System mit steifen Eigenschaften reduziert nicht nur die Spannungsschwankungen, die dann entstehen, wenn Verbraucher zugeschaltet werden, sondern mindert auch den störenden Einfluss von harmonischen Verzerrungen.

Abbildung 12: typ. Oberwellengehalt eines 6-pulse Frequenzumformers



Der IEEE® 519 Standard ist das am häufigsten verwendete Regelwerk, welches die empfohlenen Limits für harmonische Verzerrung definiert. In erster Linie beabsichtigt man damit, Grenzwerte für Verzerrungen zu definieren, die Gebäude durch deren Rückwirkungen ins Netz verursachen. Verzerrungen von einem EVU-Kunden können ins Stromnetz rückgekoppelt werden und andere EVU-Kunden am gleichen Stromnetz negativ beeinflussen. Dieser internationale Standard setzt Limits für die harmonische Verzerrung am gemeinsamen Verknüpfungspunkt (PCC, point of common coupling). Das sind die elektrischen Verbindungen zwischen den Gebäuden und dem elektrischen Distributionsnetz.

### Wie kann man Harmonische beeinflussen?

Aus Sicht des Gebäudeeigentümers ist es schwierig, den Einfluss von Verzerrungen von allen im Gebäude installierten elektrischen Komponenten vorherzusagen. In allen Gebäuden sind nicht-lineare Verbraucher zu finden, welche harmonische Verzerrungen verursachen. Und nur wenige Gebäude leiden an den negativen Effekten durch Harmonische. Das bedeutet aber nicht, dass man Verzerrungen ignorieren kann, weil es tatsächlich Gebäude gibt, wo es zu Problemen kommt! Vorsicht ist geboten, wenn eine große Anzahl von nicht-linearen Verbrauchern an einem bereits bestehenden elektrischen System hinzugefügt werden. Das kann z.B. dann passieren, wenn bei einem bestehenden Gebäude eine „Energiespar-Sanierung“ durchgeführt wird, welche bestehende lineare Verbraucher in nicht lineare Verbraucher „umwandelt“. Eine übliche Praxis ist, Probleme mit Harmonischen dort zu entschärfen, wo diese entstehen. Jedoch ist dies keine gute Wahl, wenn es sich um sehr viele kleine nicht-lineare Verbraucher handelt, z.B. PCs in einem Büro. Jedoch macht dies Sinn bei sehr großen nicht-linearen Verbrauchern. Es gibt viele Strategien mit unterschiedlichen Schadensminderungseffekten und Kosten, welche auf der Geräteebeane Anwendung finden. Die Intensität der erforderlichen Minderungsmaßnahmen hängt auch von anderen installierten Verbrauchern im System sowie deren Empfindlichkeit ab. Es ist eine Herausforderung, die richtige Wahl zu treffen.

#### Die vom IEEE 519 Standard empfohlenen Grenzwerte:

Tabelle 1: Grenzwerte der Stromverzerrung für Netzsysteme von 120V bis 69kV.

	Kurzschlussstrom	Total demand distortion (TDD)	
	Laststrom	Grenzwert	
größerer Verbraucher am kleinen Netz	<20	5%	restriktiverer TDD Grenzwert
	20-50	8%	
	50-100	12%	
	100-1000	15%	
kleiner Verbraucher am großen Netz	>1000	20%	gering restriktiver TDD Grenzwert

Tabelle 2: Grenzwerte für Spannungsverzerrung

Spannung am PCC Punkt kV	Individuelle Harmonische (%)	Total harmonic distortion (THD) Grenzwert
	U < 1.0 kV	5.0
1 kV < U < 69 kV	3.0	5%
69 kV < U < 161 kV	1.5	2.5%
161 kV < U	1	1.5%*

\*Hochspannungsanlagen können einen THD von bis zu 2% aufweisen, wo der Verursacher ein HVDC Terminal ist, dessen Effekte an Stellen im Netzwerk gedämpft werden, an denen zukünftige Benutzer angeschlossen werden können.

Die Grenzwerte für den gemeinsamen Verknüpfungspunkt (PCC) gemäß der IEEE 519 finden oft schon auf der Geräteebeane Anwendung.

Es ist eine dringende Empfehlung, die IEEE 519 bereits auf der Geräteebeane umzusetzen, auch dann wenn Minderungsmaßnahmen dort zusätzliche Kosten verursachen mögen. Diese Maßnahmen sind aber leicht zu planen und reduzieren

den Einfluss von Harmonischen auf die Verzerrung der Spannung und des Stroms, zumal diese nur von einem einzigen Verbraucher verursacht werden und dennoch das gesamte Elektrische System stören könnte.

Neue elektrische Systeme können so geplant werden, dass eine Überhitzung, welche von der Verzerrung der Ströme herrührt, unterbunden werden kann. Dies erreicht man durch überdimensionierte Nullleiter, gut bemessene Transformatoren, ggf. auch durch den Einsatz von speziellen zusätzlichen Transformatoren oder Drosseln, um die Übertragung von Oberwellen in das Netz und zu anderen elektrischen Systemen zu dämpfen.

### Zusammenfassung

Die harmonische Verzerrung steigt mit der prozentuellen Zunahme von installierten nicht-linearen Verbrauchern. Die harmonische Verzerrung von Strom und Spannung verursacht nicht immer Probleme, kann dies aber sehr wohl tun. Durch den vermehrten Einsatz von „Energie-spargeräten“ kommt es vermehrt zu Problemen mit Harmonischen, jedoch auch zu Lösungen zur Minderung der Effekte.

Das grundlegende Verständnis von Harmonischen in Bezug auf Ursache und Wirkung ist die Basis zur Lösung von Problemen mit Verzerrungen in elektrischen Systemen und Netzen.

Von Dave Guckelberger, Bob Coleman und Chris Hsieh, Trane. Um den TRANE Newsletter zu abonnieren oder frühere Versionen zu lesen besuchen Sie bitte die Web Seite unter <http://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/education-training/educational-resources-by-type/engineers-newsletters.html>  
Kommentare senden Sie bitte an [ENL@trane.com](mailto:ENL@trane.com).

Deutsche Überarbeitung im Auftrag der Trane Klima- und Kältetechnisches Büro GmbH durch ETAAGO ®

#### Quellen

- [1] IEEE 519-2014 defines acceptable limits for harmonics in electrical power systems. For more information, visit <http://standards.ieee.org>
- [2] BC Hydro website. <https://www.bchydro.com/accounts-billing/rates-energy-use/electricity-rates/power-factor.html>
- [3] Electrical Power Systems Quality“ by Dugan, McGranaghan, Santoso, and Beaty (ISBN 0-07- 138622-X)
- [4] IEEE Std 519-2014 - „IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. „
- [5] Nebuda, C and B. Bradley. „How VFDs Affect Genset Sizing.“ Engineers Newsletter vol. 35-1. 2006.

Für weitere Informationen kontaktieren Sie uns unter:

**Trane Klima- und Kältetechnisches Büro GmbH**  
**Pionierstraße 3**  
**82152 Krailling**

zentrale@trane-roggenkamp.de  
089 / 89 51 46 - 0

[www.trane-roggenkamp.de](http://www.trane-roggenkamp.de)