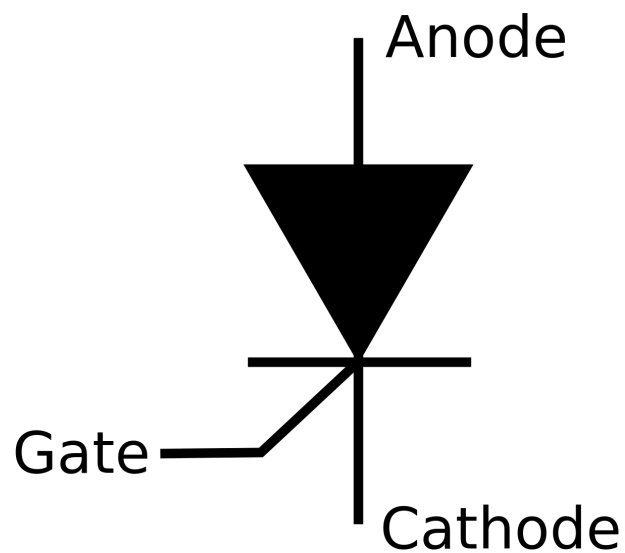


# Netzurückwirkungen von Thyristorstellern mit ohmscher Last bei verschiedenen Steuerverfahren

Fachbericht Projekt 6

Windisch, 18.01.2019



<b>Hochschule</b>	Hochschule für Technik - FHNW
<b>Studiengang</b>	Elektro- und Informationstechnik
<b>Autor</b>	Nando Spiegel und Bastian van Dijke
<b>Betreuer</b>	Felix Jenni
<b>Auftraggeber</b>	Intern

### **Zusammenfassung**

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

**Keywords:** Phasenanschnitt, Schwingungspaket, Ohmsche Last

## **Danksagung**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Phasenanschnittsteuerung . . . . .	2
2.2	Schwingungspaketsteuerung . . . . .	3
2.3	TRIAC . . . . .	4
2.4	Leistungsfaktor . . . . .	4
2.4.1	Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung . . . . .	5
2.4.2	Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung . . . . .	5
2.5	Oberschwingungen . . . . .	5
2.6	Grundlagen . . . . .	6
2.7	Verzerrte Schwingung . . . . .	6
2.8	Tripel Oberschwingungen . . . . .	7
2.9	Auswirkung von Oberschwingungen . . . . .	8
2.9.1	Harmonische Oberwellen . . . . .	8
2.9.2	Subharmonische . . . . .	9
2.9.3	Fast Fourier Transformation . . . . .	9
2.10	Total Harmonic Distortion . . . . .	9
2.11	Normen . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Simulation</b>	<b>10</b>
3.1	Simulation mit Plecs . . . . .	10
3.2	Simulation mit Matlab . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Messaufbau</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Normen</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Validierung</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Schlusswort</b>	<b>15</b>
	<b>Literatur</b>	<b>17</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>17</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>17</b>

# 1 Einleitung

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Grundlagen für die Steuerungsarten erklärt. dsafadsf

### 2.1 Phasenanschnittsteuerung

Bei der Phasenanschnittsteuerung wird das Sinussignal über einen TRIAC geführt. Ein TRIAC sind zwei antiparallel geführt Thyristoren. Dieser zündet ab einem gewissen Zündimpuls nach jedem Nulldurchgang. Je später der TRIAC eingeschaltet wird, desto kleiner wird die mittlere Leistung über der Last. Ein Vorteil gegenüber einem Spannungsteiler ist, dass weniger Leistung gebraucht wird. Der Zündwinkel kann von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  gewählt werden, wobei bei  $0^\circ$  die maximale Leistung und bei  $180^\circ$  keine Leistung über der Last anliegt. Das Problem bei der Phasenanschnittsteuerung ist, dass diese Schaltung Oberwellen verursacht und so ungewünschte Effekte für den Netzbetreiber verursacht. Ein weiteres Problem betrifft den nicht-sinusförmigen Stromverlauf. Da Strom und Spannung nicht den gleichen Verlauf haben, tritt eine Verzerrungsblindleistung auf. Der Strom verläuft zeitlich der Spannung nach wirkt so wie eine Induktivität. Deshalb wird dieses Verfahren vom EW nur bei kleinen Leistungen toleriert. Bei grossen Leistungen wird deshalb die Schwingungspaketsteuerung benutzt. In der Abbildung ?? ist ersichtlich, wie der Phasenanschnitt bei einer Netzspannung aussieht. Grau gezeichnet ist die normale Netzspannung und rot ist die Spannung welcher an der Last anliegt. In dieser Abbildung wurde ein Winkel von  $135^\circ$  gewählt und somit ist die Leistung an der Last kleiner als mit der normalen Netzspannung.

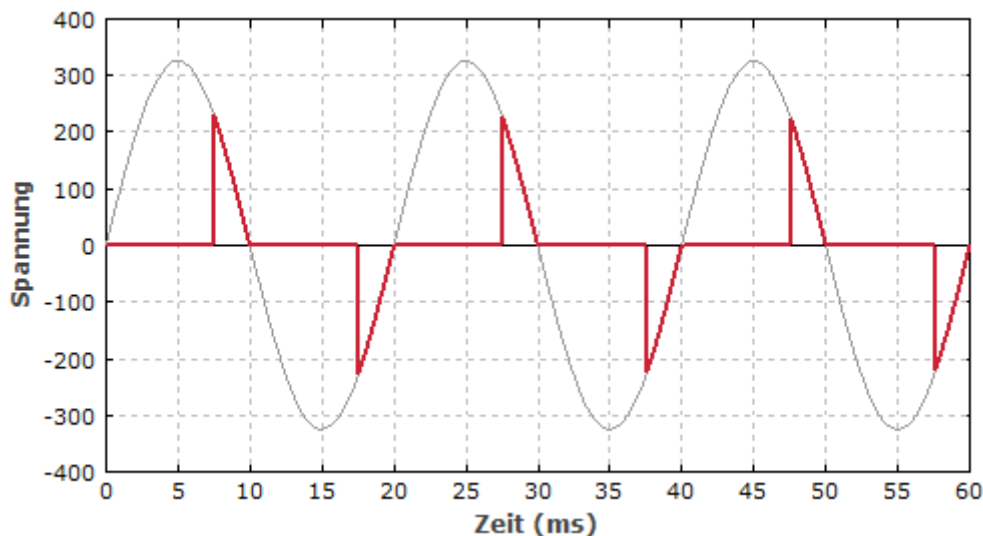


Abbildung 2.1: Phasenanschnitt mit einem Winkel von  $135^\circ$ [1]

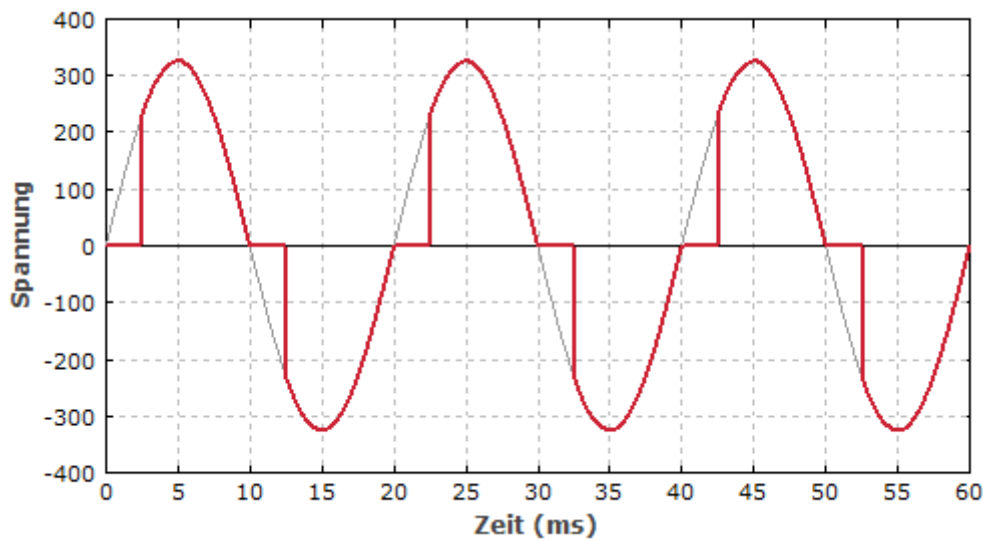


Abbildung 2.2: Phasenanschnitt mit einem Winkel von  $45^\circ$ [1]

Bei der Abbildung 2.2 ist gut ersichtlich, wie früher gezündet wurde. Somit wird die Leistung an der Last grösser.

## 2.2 Schwingungspaketsteuerung

In diesem Verfahren wird nicht wie der Phasenanschnittsteuerung die Form der Halbwellen verändert, sondern die Zeitdauer. Dabei wird immer von der Paketzeit und der Einschaltzeit ausgegangen, wobei letzteres verändert wird. Wenn z.B. eine Paketdauer 10 Halbwellen hat, und die Einschaltzeit 5 Halbwellen ist, liegt die halbe Leistung über der Last an. Anders als bei der Phasenanschnittsteuerung entstehen bei dieser Ansteuerungsart keine harmonische Oberwellen, dafür aber Sub- und Zwischenharmonische. Auf der Abbildung 2.3 ist ersichtlich, wie vier von den total sechs pro Paket eingeschaltet sind. Dies ergibt eine Leistung welche  $2/3$  so gross ist wie die Leistung mit der normalen Netzspannung.

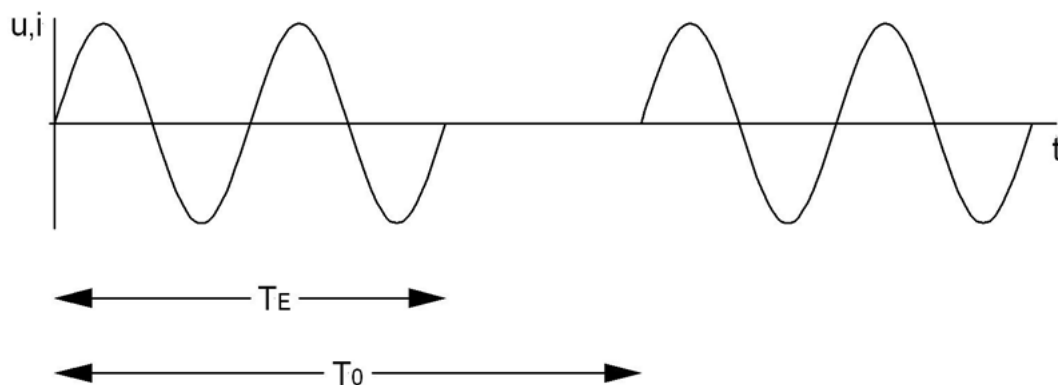


Abbildung 2.3: Schwingungspaketsteuerung  $2/3$  der Leistung [2]

Dabei ergibt sich aus dem Verhältnis von Einschaltzeit zu Periodendauer das Tastverhältnis.

$$a = \frac{T_E}{T_0} \quad (2.1)$$

## 2.3 TRIAC

Der TRIAC besteht aus zwei anti-parallelen Thyristoren und kann über das Gate gezündet werden. Der TRIAC bleibt solange leitend bis der Haltestrom unterschritten wird.

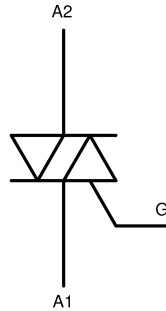


Abbildung 2.4: Schaltzeichen eines TRIACs [3]

## 2.4 Leistungsfaktor

Bei beiden Verfahren ist der Leistungsfaktor vom Zündwinkel oder dem Einschaltverhältnis abhängig.

In der Abbildung 2.5 ist ersichtlich wie der Leistungsfaktor bei den beiden Steuerungsarten aussieht. Bei der Phasenanschnittsteuerung auf der linken Seite sieht man, wie bei einem kleinen Zündwinkel der Leistungsfaktor sehr gross ist. Je grösser der Zündwinkel gewählt wird, desto kleiner wird der Leistungsfaktor. Auf der rechten Seite sieht man den Leistungsfaktor in Abhängigkeit des Einschaltverhältnisses. Je grösser das Einschaltzeitverhältnis, desto grösser der Leistungsfaktor.

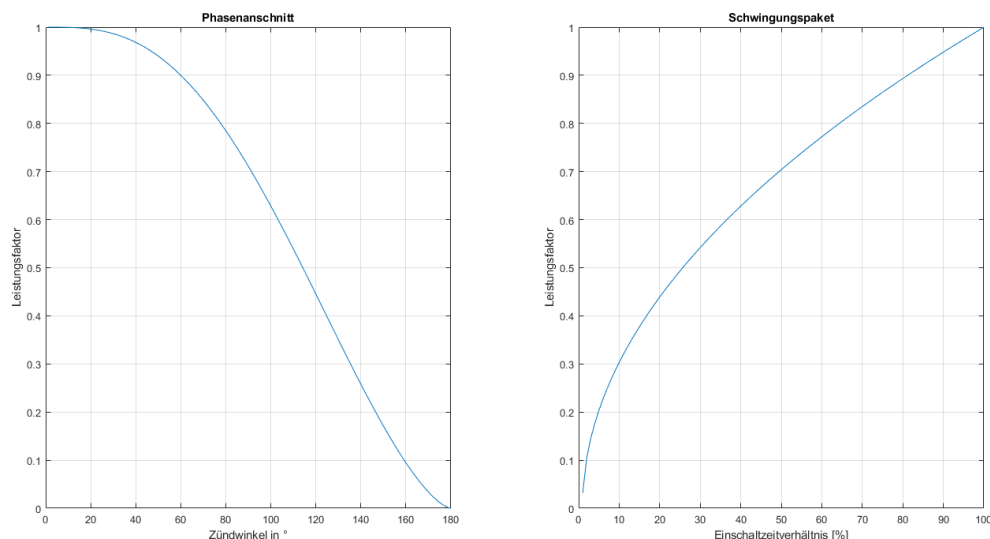


Abbildung 2.5: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung



### 2.4.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung

Der Leistungsfaktor ist definiert als das Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung.

$$\lambda = \frac{P_\alpha}{S} \quad (2.2)$$

Die Schein- und Wirkleistung können mit den folgenden Formeln beschrieben werden.

$$S = I_L \cdot U_{UN} \quad P_\alpha = I_L^2 \cdot R_L \quad (2.3)$$

Werden die Formeln 2.3 in die Formel 2.2 eingesetzt ergibt sich folgende Gleichung.

$$\frac{P_\alpha}{S} = \frac{I_L \cdot R_L}{U_{UN}} \quad (2.4)$$

Der Laststrom wird mit folgender Formel beschrieben.

$$I_L = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \cdot \frac{U_{UN}}{R_L} \quad (2.5)$$

Wenn die Formel für den Laststrom in die Gleichung 2.4 eingesetzt wird, lassen sich die Spannung und der Widerstand wegekürzen und übrig bleibt folgende Formel.

$$\lambda = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \quad (2.6)$$

### 2.4.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung

Das Einschaltverhältnis wird mit  $a$  beschrieben und wird mit der Formel 2.1 beschrieben. Die Schein- und Wirkleistung werden mit den folgenden Formeln beschrieben.

$$S_a = \sqrt{a} \cdot P \quad P_a = a \cdot P \quad (2.7)$$

Wenn die beiden Formeln für die Wirk- und Scheinleistung in die Gleichung für den Leistungsfaktor eingesetzt wird ergibt sich daraus folgende Gleichung.

$$\lambda = \frac{P_a}{S_a} = \frac{a \cdot P}{\sqrt{a} \cdot P} \quad (2.8)$$

Die Wirkleistung lässt sich wegekürzen und so ergibt sich folgende Formel.

$$\lambda = \sqrt{a} \quad (2.9)$$

## 2.5 Oberschwingungen

Im Idealfall würde bei einer Stromversorgung überall eine perfekte sinusförmige Spannung vorliegen. Jedoch sieht dies in der Realität anders aus. Die Kurve der Spannung und des Stromes weichen massiv von einer Sinusfunktion ab. Man bezeichnet diese verzerrten Schwingungsformen im Allgemeinen als Oberschwingungsbehaftetes Signal.

Schon früh erkannte man diese Oberschwingungsverzerrungen am Netz, jedoch ist es erst heute ein ernstzunehmendes Problem für die Versorgungsbetriebe, die Verteilnetzbetreiber und für den Endkunden. Früher waren die grössten Herausforderungen, die Auswirkungen von Oberschwingungsverzerrungen auf elektrische Maschinen zu erkennen. Man stellte ausserdem fest, dass Störungen in den Telefonleitungen auftraten. Allerdings kann man sagen, dass Oberschwingungsverzerrungen früher ein geringeres Gefahrenpotential darstellten als heute. Die heutigen Maschinen wurden neuerdings so konstruiert, dass sie weniger Oberwellen erzeugen. Auch bei den Verteilnetzen wurde darauf geachtet, dass sie nicht mehr an der Lastgrenze arbeiten. Seit einigen Jahren steigt, die weltweite Nachfrage nach energieeffizienten Lösungen, die nur über vermehrten Einsatz von Leistungselektronik realisierbar sind.

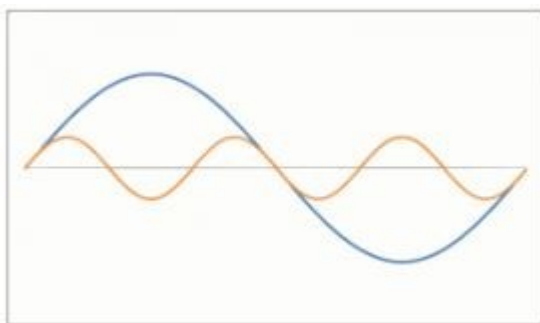
## 2.6 Grundlagen

Die Bedeutung Oberschwingung kommt aus dem Themenbereich «physische Eigenwertprobleme» also Wellen, deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundschwingungen sind. In der Musikwelt kann man Oberschwingungsfrequenzen vor allem bei Saiteninstrumenten, wie zum Beispiel bei einer Gitarre oder einer Geige beobachten. Die meisten elektrischen Geräte halten sich nach der perfekten Welle Ausschau. Bei Wechselstrom bedeutet dies eine perfekte Sinuskurve. Die elektrische Spannung wechselt gleichmässig zwischen der positiven und negativen Halbwelle hin und her. Bei einer Frequenz von 50 Hz beträgt dies genau 50-mal pro Sekunde. Der Begriff Welle ist mit dem Zusammenhang von Oberschwingungen nicht ganz korrekt. Eine Welle hat eine räumliche und zeitliche Ausdehnung, jedoch die hier betrachteten Schwingungen nur eine zeitliche Ausdehnung haben. Die Oberschwingungsanteile in einem Wechselstromsystem sind also definiert als sinusförmige Anteile einer periodischen Schwingung, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen (Ordnungszahl) der Grundfrequenz entspricht.

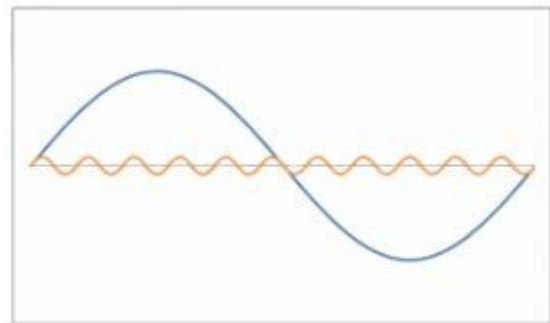
$$f_h = n \cdot \text{Grundfrequenz} \quad (2.10)$$

Ordnungszahl ( $f_h$ )	Frequenz (Hz) im Netz
1	50
3	150
5	250
7	350
11	550
13	650
...	...
$n$	$50 \cdot n$

**Tabelle 2.1:** Oberschwingungsfrequenz



**Abbildung 2.6:** Grundschwingung mit 3. Ordnung [4]



**Abbildung 2.7:** Grundschwingung mit 11. Ordnung [4]

Die folgenden zwei Abbildungen 2.6 & 2.7 zeigen eine Grundschwingung bei 50 Hz (blau) und die jeweilige 3. und 11. Harmonische der Grundfrequenz (gelb).

## 2.7 Verzernte Schwingung

Eine verzernte Schwingung entsteht durch Überlagerungen von verschiedenen sinusförmigen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Man kann eine solche Schwingung mit

unterschiedlichen Oberschwingungskomponenten, auch Komposition genannt, zusammensetzen, indem man eine Sinusschwingung mit mehreren Oberschwingungen zusammenaddiert. Das folgende wellenförmige Signal lässt sich zu einer Grundschwingung mit ihren mehreren harmonischen Oberschwingungen zerlegen.

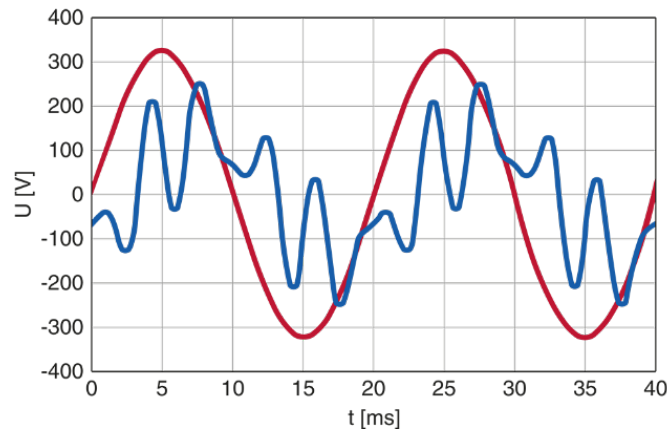


Abbildung 2.8: Zusammensetzung [4]

Die erste Person, welcher diese Methode vorgestellt hat, war der französische Mathematiker Jean Baptiste Fourier. Noch heute trägt die Fourier-Transformation diese Bezeichnung. Mit diesem Zusammenhang kann die Überlagerung von einer perfekten Sinuskurve zu einer verzerrten Sinusschwingung führen. Dies bedeutet so viel wie, eine verzerrte Sinusschwingung lässt sich immer als Überlagerung einer Grundschwingung mit anderen Oberschwingungen unterschiedlicher Frequenzen und unterschiedlichen Amplituden darstellen. Anhand eines Amplitudenspektrums lassen sich die Oberschwingungen gut visualisieren. (Erklärung Bild). Bei den Oberschwingungen handelt es sich um ungerade oder gerade harmonische Schwingungen. Die ungeraden Oberschwingungen sind die charakteristischen Oberschwingungsanteile in den heutigen Stromversorgungsnetzen. Sie stellen Wellenformen dar, die bezogen auf die Zeitachse symmetrisch sind. Aufgrund der meist dreiphasigen Symmetrie der heutigen Infrastrukturen sind nahezu alle Signale symmetrisch, obwohl es zu Verzerrung kommt. Geradzahlige Oberschwingungen können nur aus Wellenformen entstehen, die nicht symmetrisch bezogen auf die Zeitachse sind.

Bild beschreiben

## 2.8 Tripel Oberschwingungen

Oberschwingungsströme erzeugt fast jedes elektrische Gerät. Doch welches Gerät welche Stromverzerrung erzeugt wird später erklärt. Ein wichtiger Bezugspunkt zu den individuellen Oberschwingungsgrößen ist die gesamte harmonische Verzerrung. Man nennt ihn auch den THD-Wert (Total Harmonic Distortion). Diesen Wert gilt es besonders zu verstehen, damit man ihn rechnerisch analysieren kann. Er gibt ausserdem das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert der Grundschwingung an. Er wird üblicherweise in Nieder-, Mittel-, aber auch im Hochspannungsnetz verwendet. Normalerweise wird die Verzerrung des Stromes als THDi und die Verzerrung der Spannung als THDu angegeben. Der Total Harmonic Current (THC) ist der gesamte Oberschwingungsstrom. Er wird verwendet, um den Gesamteffektivwert der Oberschwingungsströme der Ordnung 2 bis 40 zu quantifizieren, die zu einer Verzerrung der Stromkurve beitragen. Diesen Wert braucht man vor allem, um die erforderlichen Eigenschaften zur Auswahl eines effizienten aktiven Oberschwingungsfilters zu bestimmen.

Einfügen  
Formel  
THC

Die gesamte harmonische Verzerrung des Stromes gibt, wie der Name schon sagt, die gesamte Verzerrung des Stromes an. Der Wert ist definiert als Quotient des Effektivwerts der Oberschwingungsströme im Verhältnis zum Grundschwingungsstrom. Typischerweise wird die Summe aller Strom Oberschwingungsanteile in Bezug auf den Grundschwingungsstrom bis einschliesslich der 40. Oberschwingung berechnet. Die Oberschwingungsströme, welche durch Lasten in Netzwerken erzeugt werden, müssen durch die Impedanzen der Transformatoren oder Drosseln fließen. An diesen Impedanzen kommt es zu nichtlinearen Spannungsabfällen. Es werden Oberschwingungsspannungen erzeugt die im ganzen Netz verbreitet werden. Diese können an Endgeräten eine Verzerrung der Versorgungsspannung verursachen. Somit ist die harmonische Verzerrung des Stromes (THDi) eine direkte Ursache für die Verzerrung der Spannung (THDu = Total Harmonic Distortion of Voltage). Sie gibt das Ausmass der Verzerrung der Versorgungsspannung an. Auch dieser Wert ist definiert als Quotient des Effektivwertes der Spannungs Oberschwingungsanteile bis zur 40. Oberschwingung bezogen auf den Effektivwert der Grundschwingung.

Formel  
THDi mit  
Summe und  
THDu

Je niedriger der THDu-Wert ist, desto besser ist die Spannungsqualität. Die Norm besagt, dass der gesamte Oberschwingungsgehalt den Wert von 8% nicht überschreiten darf. Dazu kommt, dass heute üblicherweise für die Verzerrung die THD-Werte angegeben sind und nicht wie früher die Oberschwingungsgehalte (Klirrfaktore).

Wenn man sich mit den Oberschwingungsproblematik befasst, ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zu verstehen. Dadurch ist es möglich eine geeignete Lösung für das reduzieren von Oberschwingungen zu finden. Je nach Eigenschaft der Oberschwingungserzeuger und der Eigenschaft eines Gerätes am elektrischen Netz, verbreiten sich Oberschwingungsströme in einem System unterschiedlich. Verschiedene Spannungsverzerrungen sind die Folgen.

## 2.9 Auswirkung von Oberschwingungen

Falls Oberschwingungen oder andere Netzzrückwirkungen bei Betriebsmitteln auftreten, können die Funktionen von den Geräten beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. Ein Beispiel dafür wäre, im Falle einer Kurzzeitunterberechnung bei Schaltnetzteil würden sie mit extrem hohen Einschaltspitzen reagieren. Diese Spitzen könnten das 20-fache der Nennlast erreichen. Im einphasigen Verbrauch in einem Dreiphasigen-Wechselstromsystem fliesst der ganze Rückleitstrom über den Sternpunkt des Transformators zurück. Gäbe es viele Schaltnetzteile in einem System, würden sich die Rückleiterströme nicht mehr aufheben, sondern sie würden sich addieren. Die Folgen davon wäre eine Sternpunktverschiebung. Oberschwingungen können bei Glühlampen die Glühfadentemperatur erhöhen und somit die Lebensdauer verkürzen. Auch bei Dreh- oder Wechselstrommotoren und -generatoren führen Strom Oberschwingungen zu zusätzlicher Erwärmung. Bei Schutzgeräten wie Distanzschutz, Überstromschutz oder Differentialschutz können Oberschwingungen den Aufbau und die Wirkungsweise des Schutzgerätes beeinflussen. Sind die Abstände zwischen Freileitungen und Telefonleitungen zu gering, können die Oberschwingungen die Sprachübertragung stören. Dabei gibt es vor allem ein Auge auf die 20. bis zur 30. Ordnung der Oberschwingung zu werfen.

### 2.9.1 Harmonische Oberwellen

Um die einzelnen Vor- und Nachteile besser verstehen zu können, muss weiter erklärt werden, was die harmonische Oberwellen sind und wie sich diese im Netz verhalten.

### 2.9.2 Subharmonische

Da nicht nur harmonische Oberwellen verglichen werden, werden hier noch die Subharmonische erklärt und was der Unterschied zu den harmonischen Oberwellen ist.

### 2.9.3 Fast Fourier Transformation

Damit die beiden Spektren der Oberwellen verglichen werden können, wird diese in einem FFT Diagramm aufgezeigt. Wie diese zu lesen sind und was sie aussagen, wird hier beschrieben.

## 2.10 Total Harmonic Distortion

Um die beiden Steuerungsarten vergleichen zu können, wird der THD benötigt. Wie dieser berechnet wird, wird in diesem Kapitel aufgezeigt.

### 2.11 Normen

Andere Kapitel rauslö-  
schen?  
Oder Titel anpassen

### 3 Simulation

Die beiden Steuerungsarten wurden mit Plecs und Matlab simuliert um genauer analysieren zu können, wie sich diese verhalten.

#### 3.1 Simulation mit Plecs

Es wurde mit Plecs die Phasenanschnitt- und Schwinungspaketsteuerung und die Komination aus beiden Verfahren erstellt. Hier werden die Simulationen aufgezeigt sowie auch das FFT der einzelnen Verfahren.

#### 3.2 Simulation mit Matlab

Um die Plecs-Simulation zu verifizieren, wurde die Verfahren auch mittels Matlab simuliert. In diesem Kapitel werden aufgezeigt wie dies gemacht wurde sowie die Resultate mit Plecs verglichen.

## **4 Messaufbau**

Die Kombination aus beiden Verfahren wurde im Labor aufgebaut um das Verhalten in Realität beobachten zu können. Hierbei wird das Schema und der Messaufbau aufgezeigt.

## 5 Normen



## **6 Umsetzung**

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie das fertige Produkt aufgebaut ist.

## 7 Validierung

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Schritte gemacht wurden um sicherzustellen, dass das fertige Produkt auch funktioniert.

## 8 Schlusswort

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

## Ehrlichkeitserklärung

Wir erklären eidesstattlich, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Nando Spiegel

Bastian van Dijke

---

---

Windisch, am 18.01.2019

## Literatur

- [1] Dr. Rüdiger Paschotta. (2018). Phasenanschnittsteuerung, Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/phasenanschnittsteuerung.html> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [2] WolfgangS. (2006). Schwingungspaketsteuerung, Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schwingungspaketsteuerung.png> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [3] Wikipedia. (2006). Circuit symbol for a triac, Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Triac#/media/File:Triac.svg> (besucht am 24. Apr. 2019).
- [4] Alexander Kamenka. (2019). OBERSCHWINGUNGEN KAPITEL 1: OBERSCHWINGUNGEN – DIE GRUNDLAGEN, Adresse: <https://www.ihks-fachjournal.de/sechstemen-um-oberschwingungen-und-netzqualitaet-in-stromversorgungsnetzen/> (besucht am 4. Mai 2019).

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Phasenanschnitt mit einem Winkel von $135^\circ$ [1]	2
2.2	Phasenanschnitt mit einem Winkel von $45^\circ$ [1]	3
2.3	Schwingungspaketsteuerung 2/3 der Leistung [2]	3
2.4	Schaltzeichen eines TRIACs [3]	4
2.5	Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung	4
2.6	Grundschiwingung mit 3. Ordnung [4]	6
2.7	Grundschiwingung mit 11. Ordnung [4]	6
2.8	Zusammensetzung [4]	7

## Tabellenverzeichnis

2.1	Oberschwingungsfrequenz	6
-----	-------------------------	---