

# Netzrückwirkungen von Thyristorstellern mit ohmscher Last bei verschiedenen Steuerverfahren

Fachbericht Projekt 6

Windisch, 18.01.2019



**Hochschule**

Hochschule für Technik - FHNW

**Studiengang**

Elektro- und Informationstechnik

**Autor**

Nando Spiegel und Bastian van Dijke

**Betreuer**

Felix Jenni

**Auftraggeber**

Intern

## **Zusammenfassung**

Hier könnte Ihre Werbung stehen.

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

## Danksagung

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Phasenanschnittsteuerung . . . . .	2
2.2 Schwingungspaketsteuerung . . . . .	3
2.3 Leistungsfaktor . . . . .	4
2.3.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung . . . . .	4
2.3.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung . . . . .	5
2.4 Auftretende von verzerrten Sinusschwingungen . . . . .	5
2.5 Oberschwingungen . . . . .	5
2.6 Verzerrte Schwingung . . . . .	6
2.7 Vorkommen der Oberschwingungen . . . . .	8
2.8 Auswirkung von Oberschwingungen . . . . .	9
2.9 Anforderung an die Netzqualität . . . . .	9
2.10 Gegenmassnahmen bei Oberschwingungen . . . . .	9
2.10.1 Vermeidung von Störungen . . . . .	9
2.10.2 Stromnetzeigenschaften . . . . .	10
2.10.3 Oberschwingungsfilter . . . . .	10
2.10.4 Änderung der Energieversorgung . . . . .	10
2.10.5 EMV verträgliche Gebäudeinstallation . . . . .	10
2.11 Zwischen- und Subharmonischen Schwingungen . . . . .	11
2.12 Normen . . . . .	11
2.12.1 EN 61000-3-2 . . . . .	11
2.12.2 EN 61000-3-3 . . . . .	13
2.12.3 EN 61000-2-2 . . . . .	17
<b>3 Simulation</b>	<b>19</b>
3.1 Simulation mit Matlab . . . . .	19
3.2 Simulation mit Plecs . . . . .	23
3.2.1 Alternative Ansteuerungen . . . . .	27
<b>4 Messaufbau</b>	<b>28</b>

<b>5 Umsetzung</b>	<b>29</b>
5.1 Laboraufbau . . . . .	29
5.1.1 Filter . . . . .	29
5.1.2 Verstärkerschaltung . . . . .	29
5.2 Laboraufbau mit Widerstand . . . . .	30
5.3 Arduino . . . . .	31
5.3.1 Schwingungspaketsteuerung mit Arduino . . . . .	31
5.3.2 Phasenanschnittssteuerung mit Arduino . . . . .	31
5.4 Messungen . . . . .	32
5.4.1 Schwingungspaketsteuerung mit Last in Stern . . . . .	32
5.5 Phasenanschnittsteuerung mit 2 Thyristoren mit Last in Stern . . . . .	32
<b>6 Validierung</b>	<b>33</b>
<b>7 Schlusswort</b>	<b>34</b>
<b>Literatur</b>	<b>36</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>36</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>37</b>
<b>A Matlab-Berechnungen</b>	<b>38</b>
A.1 Leistungsfaktor . . . . .	38

## 1 Einleitung

Die vorliegende Projektarbeit gliedert sich in XX Kapitel. Im ersten Teil werden die Grundlagen erläutert, welche relevant zur

Im ersten Kapitel wird die Geschichte der Electric Car Company und deren Auto, den Detroit erläutert. Im nächsten Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Detroit beschrieben. Daraus ist der Istzustand und die Funktion der Bestandteile ersichtlich. Im dritten Kapitel werden die Anpassungen, die Verbesserungen und vor allem die Umsetzung beschrieben. Der letzte Teil beinhaltet die Validierung. Bevor das Fahrzeug an seinem Besitzer zurück geben werden kann, musste man noch einige Tests durchführen. Diese sind in diesem Teil beschrieben.

## 2 Grundlagen

Im diesem ersten Kapitel sollen die Grundlagen, die für diese Arbeit als Wichtig empfunden wurde, aufgelistet werden. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die beiden Steuerverfahren, Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung, sowie auf deren Vor- & Nachteile gerichtet. Da bei solchen Methoden das auftreten von verzerrten Signalen fast nicht zu vermeiden ist, enthält der folgende Abschnitt einige Details über das Vorkommen und die Auswirkungen von Ober-, Zwischen und Subharmonischen Schwingungen. Durch Normen welche zwingend eingehalten werden müssen, sind bei den beiden Verfahren gewisse Grenzen gesetzt. Damit man versteht auf welche Normen geachtete wurde, sind schlussendlich die drei wichtigsten zusammengefasst.

### 2.1 Phasenanschnittsteuerung

Bei der Phasenanschnittsteuerung wird das Sinussignal über einen TRIAC geführt. Ein TRIAC sind zwei antiparallel geführte Thyristoren. Dieser zündet ab einem gewissen Zündwinkel 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  $180^\circ$  eingestellt 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 produziert und so unerwünschte 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 und wirkt so wie eine Induktivität. Deshalb wird dieses Verfahren von den Elektrizitätswerk nur bei kleinen Leistungen bis zu 200 Watt, bei symmetrischen Anschnittsteuerung von Wärmegeräten toleriert. Bei grösseren Leistungen wird deshalb die Schwingungspaketsteuerung verwendet. Auf der Abbildung 2.1 ist ersichtlich, wie der Phasenanschnitt bei einer Netzspannung aussieht. Die grau gezeichnete Kurve ist die normale Netzspannung und die rote ist die Spannung, welcher an der Last anliegt. In dieser Abbildung wurde ein Winkel von  $135^\circ$  eingestellt. Die Leistung an der Last ist somit kleiner, als wenn die normale graue Netzspannung anliegen würde.

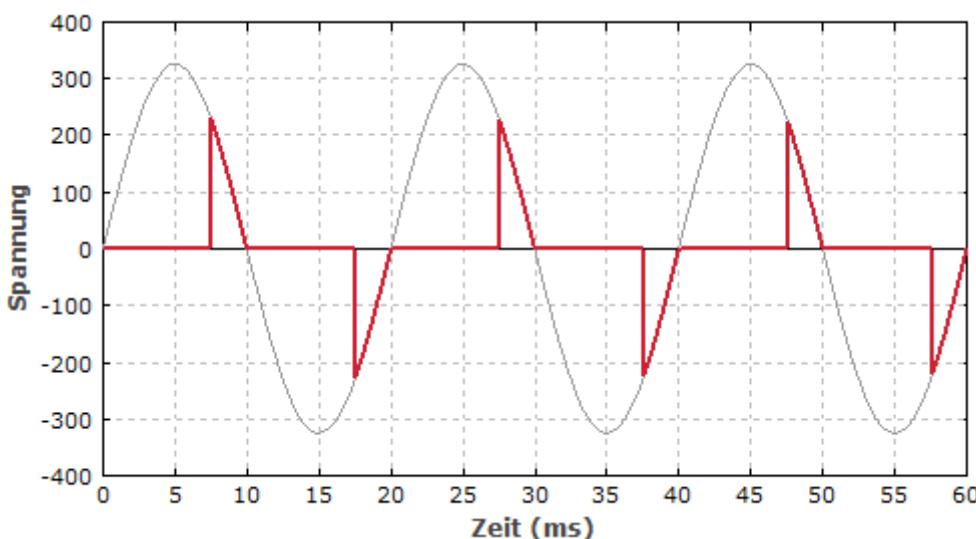
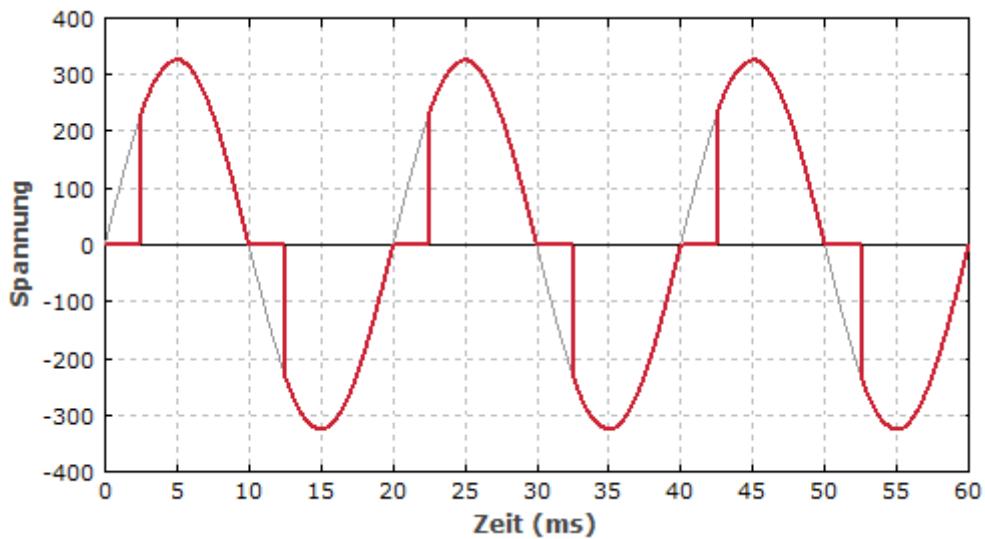


Abbildung 2.1: Phasenanschnitt mit einem Winkel von  $135^\circ$ [1]

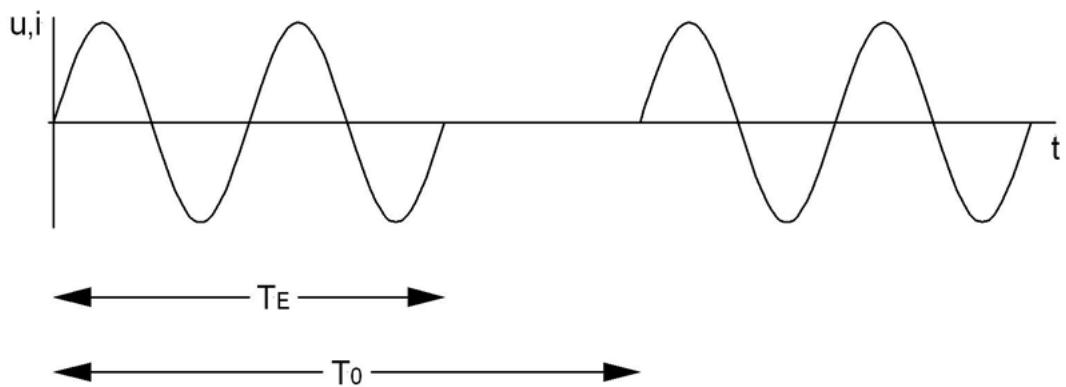


**Abbildung 2.2:** Phasenanschnitt mit einem Winkel von  $45^\circ$ [1]

In der Abbildung 2.2 ist ersichtlich, dass die Phase früher gezündet wurde. Somit erhält man eine an der Last eine grössere Leistung.

## 2.2 Schwingungspaketsteuerung

In diesem Verfahren wird nicht wie bei der Phasenanschnittsteuerung die Form der Halbwellen verändert, sondern die Zeitdauer der Halbwellen, welche an der Last anliegen. Wichtig sind dabei die Paketdauer  $T_0$  und die Einschaltzeit  $T_E$ , wobei letzteres verändert wird. Wenn z.B. eine Paketdauer 10 Halbwellen hat, und 5 Halbwellen eingeschaltet sind, 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 Halbwellen pro Paket eingeschaltet sind. Dies ergibt eine Leistung welche  $2/3$  so gross ist, wie die 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 Leistungsfaktor

Um die zwei Ansteuerungsverfahren miteinander vergleichen zu können, wird der Leistungsfaktor benötigt. Bei der Phasenanschnittsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig von Zündwinkel. Bei der Schwingungspaketsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig vom Einschaltverhältniss. Die genaueren Berechnungen der Faktoren wird in der Formel 2.6 & 2.9 beschrieben.

In der Abbildung 2.4 ist ersichtlich wie der Leistungsfaktor bei den beiden Steuerungsarten aussieht. Bei der Phasenanschnittsteuerung auf der linken Seite sieht man, wie bei einem kleinem 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 Einschaltzeitverhältnisses. Je grösser das Einschaltzeitverhältnis, desto grösser der Leistungsfaktor.

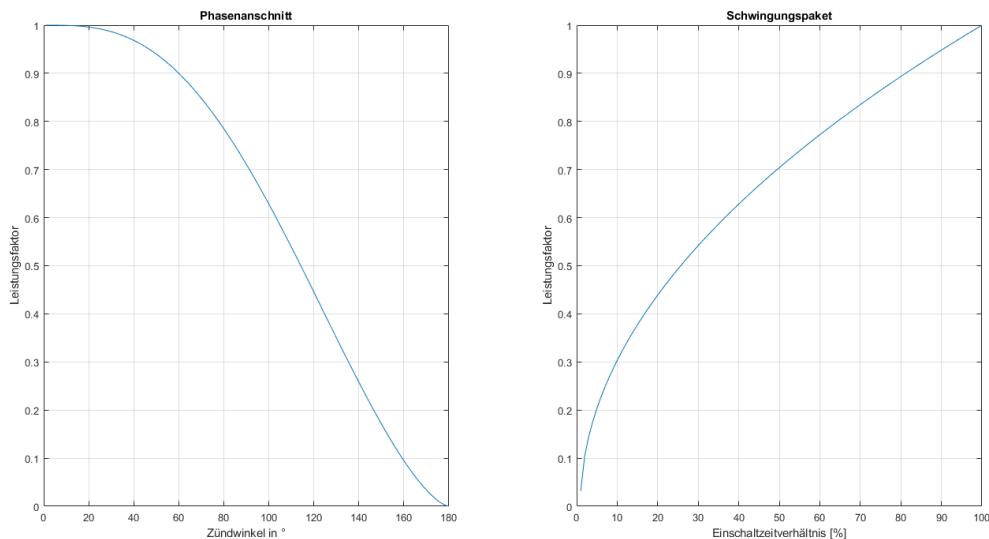


Abbildung 2.4: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung

### 2.3.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung

Der Leistungsfaktor ist definiert als 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 weglassen und übrig bleibt folgende Formel.

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

### 2.3.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung

Das Einschaltungsverhältnis wird als  $a$  definiert und wird mit der Formel 2.1 beschrieben. Die Schein- und Wirkleistung werden mit den folgenden Formeln bezeichnet.

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

Wenn die beiden Formeln für die Wirk- und Scheinleistung in die Gleichung für den Leistungsfaktor eingesetzt werden 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 weglassen und so ergibt sich folgende Formel.

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

## 2.4 Auftretende von verzerrten Sinusschwingungen

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, welche den Ton der Sprache beeinträchtigte. 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 Lastobergrenze arbeiten und so ein reineres Sinussignal verwenden. Seit einigen Jahren steigt, die weltweite Nachfrage nach energieeffizienten Lösungen, die nur über vermehrten Einsatz von Leistungselektronik realisierbar sind.

## 2.5 Oberschwingungen

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 nach der perfekten Welle Ausschau. Bei Wechselstrom definiert die Perfektion eine perfekte Sinuskurve. Die daraus verwendete elektrische Spannung wechselt gleichmässig zwischen der positiven un 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

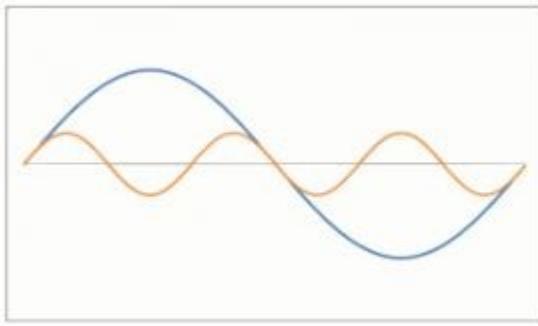
zeitliche Ausdehnung, jedoch haben die hier betrachteten Schwingungen nur eine zeitliche Ausdehnung. Die Oberschwingungsanteile in einem Wechselstromsystem sind also definiert als sinusförmige Anteile einer periodischen Schwingung, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen (Ordnungszahl) der Grundfrequenz entspricht. In der unteren Tabelle erkennt man, welche Ordnungszahl ( $n$ ) zu welcher Frequenz ( $f_h$ ) gehört. Es ist ersichtlich, dass zum Beispiel die 5. Oberschwingung eine Frequenz von 250 Hz hat. Die Berechnung der Oberschwingungsfrequenz ist in der unterstehenden Formel 2.10 dargestellt.

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

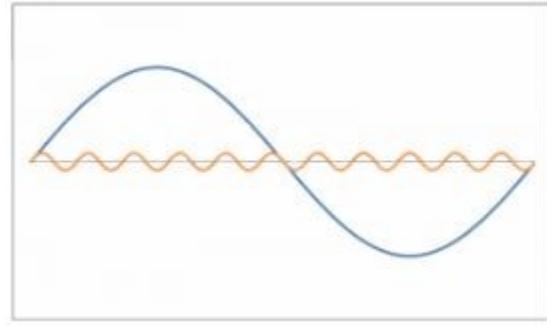
Ordnungszahl $n$	Oberschwingungs- frequenz (Hz) $f_h$
1	50
3	150
5	250
7	350
11	550
13	650
...	...
$n$	$50 \cdot n$

**Tabelle 2.1:** Oberschwingungsfrequenzen

Die folgenden zwei Abbildungen 2.5 & 2.6 zeigen eine Grundschwingung bei 50 Hz (blau) und die jeweilige 3. und 11. Ordnung der Grundfrequenz (gelb).



**Abbildung 2.5:** Grundschwingung mit 3. Ordnung [3]



**Abbildung 2.6:** Grundschwingung mit 11. Ordnung [3]

## 2.6 Verzerrte Schwingung

Eine verzerrte Schwingung entsteht durch Überlagerungen von verschiedenen sinusförmigen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden. Man kann eine solche Schwingung mit den unterschiedlichen Oberschwingungskomponenten zusammensetzen, indem man eine Sinusschwingung mit mehreren Oberschwingungen zusammenaddiert. Ein wellenförmiges verzerrtes Signal lässt sich so zu einer Grundschwingung mit ihren mehreren harmonischen Oberschwingungen zerlegen. Bei der untenstehenden Graphik 2.7 ist diese ersichtlich, wobei die rote Kurve das verzerrte Signal darstellt. Die drei blauen Sinusschwingungen sind die Zerlegungen zur Grundschwingung, zur 3. und 5. harmonische Oberschwingung. Addiert man die drei blauen Kurven zusammen, so erhält man wiederum das verzerrte rote Signal.

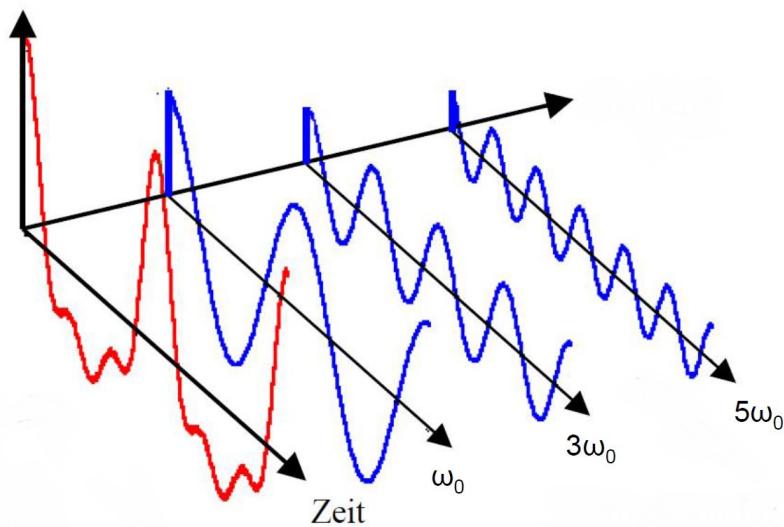


Abbildung 2.7: Addition der verschiedenen Oberwellen [4]

Die erste Person, welcher diese Methode vorgestellt hat, war der französische Mathematiker Jean Baptiste Fourier. Noch heute trägt die Fourier-Transformation dessen Namen. Anhand eines Amplitudenspektrums lassen sich die Sinuskurven bei den verschiedenen harmonischen Frequenzen übersichtlich visualisieren. Da das Amplitudenspektrum jedoch keine Informationen über die Phasenlage der einzelnen Harmonischen enthält wird zusätzlich noch ein Phasenspektrum betrachtet. In der Praxis wird dieses Spektrum jedoch oft einfach weggelassen. Mit der folgenden Fourier-Reihe lässt sich eine beliebige periodische Funktion als Summe von Sinus- und Cosinus-Funktionen darstellen:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(nx) + b_n \cdot \sin(nx)] \quad (2.11)$$

Mathematisch berechnet man die dazu benötigten Fourier-Koeffizienten  $a_0$ ,  $a_n$  und  $b_n$  mit Hilfe der untenstehenden Formeln.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2.12)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot x) dx \quad (2.13)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(n \cdot w_0 \cdot x) dx \quad (2.14)$$

Mit den oben genannten Fourier-Koeffizienten lassen sich nun das Amplituden- und Phasenspektrum berechnen.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.15)$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.16)$$

Bei den Oberschwingungen gibt es ungerade oder gerade harmonische Schwingungen. Die ungeraden Oberwellen 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.

## 2.7 Vorkommen der Oberschwingungen

Oberschwingungsströme erzeugt fast jedes elektrische Gerät. 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 das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Effektivwert der Grundschwingung an. Man verwendet ihn üblicherweise im Nieder-, Mittel-, aber auch im Hochspannungsnetz. Normalerweise wird die Verzerrung des Stromes als  $THDi$ , beschrieben in der Formel 2.20 und die Verzerrung der Spannung als  $THDu$ , ersichtlich in der Formel 2.19, 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. Man erkennt dies in der Formel 2.17. Diesen Wert braucht man vor allem, um die erforderlichen Eigenschaften zur Auswahl eines effizienten aktiven Oberschwingungsfilters zu bestimmen.

$$THC = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} \quad (2.17)$$

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 Stromoberschwingungsanteile 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  $THDu$ . Sie gibt das Ausmass der Verzerrung der Versorgungsspannung an. Auch dieser Wert ist definiert als Quotient des Effektivwertes der Spannungsoberschwingungsanteile bis zur 40. Oberschwingung bezogen auf den Effektivwert der Grundschwingung. Folgende Formel zeigt, wie die Totale Verzerrung des Stromes in Prozent berechnet ist.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Parallel dazu zeigt die untere Formel die Totale Verzerrung der Spannung in Prozent.

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

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.

## 2.8 Auswirkung von Oberschwingungen

Falls Oberschwingungen oder andere Netzrückwirkungen bei Betriebsmitteln auftreten, können die Funktionen von den Geräten beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. Ein Beispiel dafür wäre, im Falle einer Kurzzeitunterberechnung bei Schaltnetzteile, 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 Glühbirnen die Glühladentemperatur erhöhen und somit die Lebensdauer verkürzen. Auch bei Dreh- oder Wechselstrommotoren und -generatoren führen Stromoberschwingungen zu zusätzlicher Erwärmung. Bei Schutzgeräten wie Distanzschutz, Überstromschutz oder Differentialschutz können Oberschwingungen den Aufbau und die Wirkungswiese 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 Anforderung an die Netzqualität

Um die Anforderungen der Netzqualität zu gewährleisten müssen die Normen eingehalten werden. Auf welche Nomen bei dieser Arbeit genau geachtet wurde, wird zu einem späteren Zeitpunkt erläutert. Zweck der Normen sind es die verschiedene Merkmale wie zum Beispiel Frequenz, Höhe, Kurvenform oder die Symmetrie der drei Leiterspannungen einzuhalten. Durch Lastspannung, Störeinflüsse von bestimmten Anlagen oder Auftreten von Fehlern können diese Merkmale während des Normalbetriebes des Netzes geändert werden.

## 2.10 Gegenmassnahmen bei Oberschwingungen

Es kann durchaus vorkommen, dass in der Praxis harmonische Oberschwingungen festgestellt wurden, welche die zulässigen Grenzwerte überschreiten. Es gibt jedoch Möglichkeiten diese zu verhindern und so die Netzqualität zu verbessern. Im folgenden Abschnitt werden auf ein paar Varianten eingegangen.

### 2.10.1 Vermeidung von Störungen

Das Vermeiden von Störungen ist die einfachste Art um eine Verbesserung der Netzqualität sicher zu stellen. Der Gesetzgeber liefert dafür Normen der Elektromagnetischen Verträglichkeit, welche den gesetzlichen Grundlagen entsprechen. Sie sind zwingend einzuhalten.

## 2.10.2 Stromnetzeigenschaften

Könnte man die Netzimpedanz verringern wäre eine Reduktion der Oberschwingungen möglich. Dies ist jedoch generell nicht umsetzbar und somit kann man Kurzschlussleistung des Netzes nicht beliebig erhöhen. Die wirtschaftlichen und technischen Grenzen sind hierzu massgebend.

## 2.10.3 Oberschwingungsfilter

Zur Begrenzung von Oberschwingungen werden heutzutage meistens mehrere aufeinander abgestimmte passive Filter eingesetzt. Das einsetzen von den Filtern muss jedoch für jede konkrete Installation neu erstellt werden, um eine Verbesserung des Netzrückwirkungsverhaltens zu erhalten.

Die Industrie entwickelte wegen diesem Problem aktive Oberschwingungsfilter. Sie können sich, auch bei späteren Erweiterungen der Installation, an die neu Situation anpassen und müssen nicht ersetzt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Flexibilität des Filters ist es, dass die Nenngrösse einfach vom aktuellen Bedarf gewählt werden kann.

## 2.10.4 Änderung der Energieversorgung

Stark nichtlineare Betriebsmittel und empfindliche Verbraucher die zusammen an einer Gruppe angeschlossen sind, können aufgetrennt und an separate Gruppen über jeweils einen separaten Transformator eingespeist werden. Eine solche Änderung der Energieversorgung sollte aber auch immer unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet werden.

## 2.10.5 EMV verträgliche Gebäudeinstallation

Um Schäden durch Oberschwingungen zu vermeiden müssen bei Gebäuden die Installation EMV-verträglich sein. Folgende Punkte sollten dabei zwingend beachtet werden:

- Es sollte ein konsequentes TN-S-Netz mit getrenntem Neutral- und Schutzleiter aufgebaut werden. Die beiden Leiter sollten nur eine Verbindung zwischen einem Punkt haben.
- Um Schäden an einer Anlage zu vermeiden wäre ein Überspannungsschutz für Kompensationsanlagen von Vorteil.
- Wie schon erwähnt, wären getrennte Stromkreisgruppen für allgemeine und IT-Betriebsmittel vorteilhaft.
- Leitende oder metallene Teile, wie zum Beispiel Trasse, Rohre oder Lüftungskanäle sollten zwingend mit dem Potentialausgleich verbunden werden.

Auch die Energieversorgung bei der Gebäudeinstallation sollte EMV-verträglich sein. Folgende Punkte sollten dabei eingehalten werden.

- Das Erdungssystem sollte niederohmig und stromfähig installiert sein.
- Im Schutzleiter- und Potenzialausgleich-Systeme sollten keine Arbeitsströme zugelassen sein.
- Bei Mehrfacheinspeisung dürfen keine Mehrfacherdung des Neutralleiters zugelassen werden.
- Der Kabelquerschnitt sollte für die Oberschwingungen ausgelastet sein.

## 2.11 Zwischen- und Subharmonischen Schwingungen

Die Subharmonischen sind Sinusförmige Schwingungen, deren Frequenz unterhalb der Grundfrequenz entstehen. Ein Beispiel dafür wären Schwingungen bei Frequenzen von 5, 10, oder 20 Hz bei einer Grundfrequenz von 50 Hz. Bei den Zwischenharmonischen handelt es sich um Sinusschwingungen welche zwischen den Harmonischen Schwingungen entstehen. Ihre Frequenz ist kein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz von 50 Hz. Diese zwei Schwingungsarten erkennt bei der Abbildung 2.8 Die Zwischenharmonischen-Frequenzen und den damit verbunden Spannungsabfall entstehen dann, wenn elektrische Geräte eine getaktete Stromaufnahme haben, deren Takt-Frequenz kein natürliches Vielfaches der Netzfrequenz ist. Ein Beispiel eines solchen Phänomen erkennt man bei direkten Umrichtern, die keinen Zwischenkreis haben. Die Folgen von Zwischenharmonischen Spannungen sind Störungen auf Kommunikationseinrichtungen die zum Beispiel Rundsteuerempfänger massiv irritieren. Die Rundsteuerempfänger hören nur auf eine bestimmte Frequenz, die kein Vielfaches von 50 Hz ist. Sie liegen unterhalb von wenigen kHz. Fallen die Frequenzen nun genau auf die Zwischenharmonischen so können sie vom Rundsteuerempfänger als falsche Signale interpretiert werden. Eine weitere negative Auswirkung die Zwischenharmonische hervorrufen sind Fehlverhalten auf die Funktion von Dimmerschaltungen. Die Thyristoren können zu früh oder zu spät zünden und so zu unfreiwilligem lichtflackern der Beleuchtung führen.

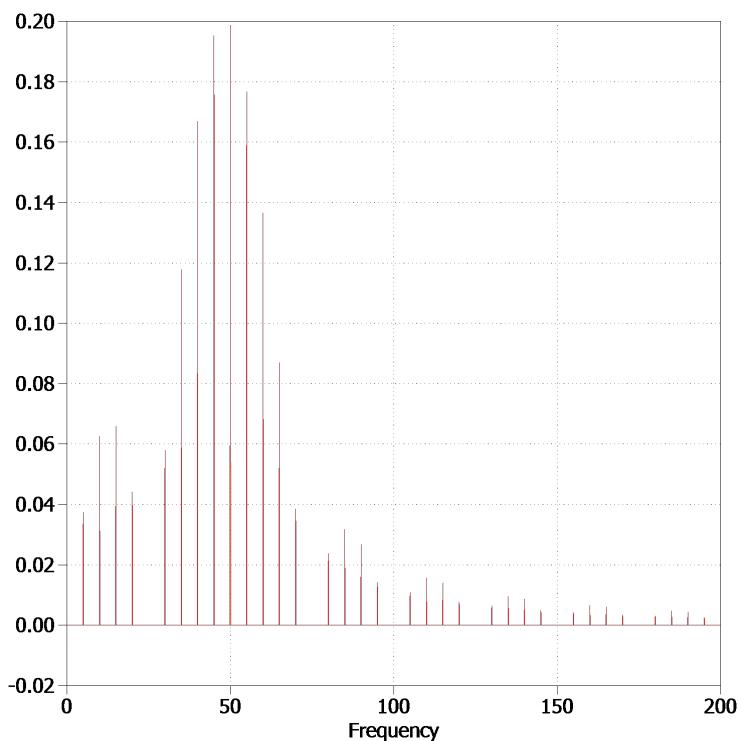


Abbildung 2.8: Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz

## 2.12 Normen

Bei der Formulierung Normen handelt es sich um eine Herausgabe von Regeln, Merkmale oder Leitlinien, die von verschiedenen Organisatoren und deren Expertengruppen bestimmt wurden. Die gesicherten Ergebnisse, welche auf Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren wurden zum Beispiel in den EN-Normen festgehalten und sorgfältig dokumentiert. Sie sollen einen optionale Vorteil für die Gesellschaft und bestimmte Qualitäten erhalten. Im folgenden Text

gibt es eine kurze Zusammenfassung der Normen, die für diese Arbeit als wichtig empfunden wurde und auf die man eingegangen ist und mit den gemessenen Werten verglichen hat. Es handelt sich dabei vor allem um die Spannungsqualität welche aus verschiedene Blickwinkeln angeschaut wurde. Die Normen EN 61000-3-2 und EN 61000-3-3 (Grenzwerte für Oberschwingungsströme, Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker im öffentlichen Netz) beschreiben, welche Art ein Elektrogerät sein soll, damit die ins Stromnetz hinein übertragenen Störungen in Grenzen gehalten werden. Eine weitere Norm, welche betrachtet wurde ist die EN 61000-2-2. Bei dieser Norm handelt es sich um die Elektromagnetische Verträglichkeit bei Umgebungsbedingung für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in die öffentlichen Versorgungsnetzen.

Die betrachteten Normen sind in diesem Bericht nicht im Detail erläutert. Nur die für uns wichtigen Teile sind Zusammengefasst. Für weitere Segmente können die Normen nachgelesen werden.

### 2.12.1 EN 61000-3-2

Diese Norm wendet man auf elektrische und elektronische Geräte (Betriebsmittel und Einrichtungen) bis zu einem Eingangsstrom von 16A je Leiter an. Außerdem ist der Anschluss des Gerätes an das öffentliche Niederspannungs-Verteilnetz vorgesehen. Die Norm definiert die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangsstromes bis zur 40 Harmonischen, die durch ein Gerät hervorgerufen werden können, das unter festgelegten Bedingungen geprüft wird. Da heutzutage die Zahl der nichtlinearen Verbraucher am öffentlichen Versorgungsnetz zunehmend steigt, steigt auch der Anteil des Oberschwingungsgehalts der Versorgungsspannung. Schaltnetzteile, Audio-Verstärker, Beleuchtungseinrichtung aber auch Waschmaschinen, Mikrowellenöfen oder auch Klimageräte sind typische Verursacher von solchen Oberschwingungen. Die nicht-sinusförmige (und somit oberschwingungsbehaftete) Stromentnahme verursacht an der Netztimpedanz Spannungsabfälle. Das Resultat ist eine Abweichung des Spannungsverlaufs von dem idealen Sinus des Netzes. Um normgerechte und reproduzierbare Messungen der Stromober schwingungen durchführen zu können, muss ein ideales oberschwingungsfreies Netz zur Verfügung stehen. Laut der Norm EN 61000-3-2 darf die Prüfquelle eine bestimmten Oberwellengehalt nicht überschreiten. Es muss sichergestellt werden, dass ausschliesslich die vom Verbraucher erzeugte Stromober schwingung gemessen werden. Beginnt man mit der Prüfung muss der Prüfling so eingestellt werden, dass der höchste Gesamt-Oberschwingungsstrom (maximal total harmonic current) unter üblichen Betriebsbedingungen erreicht wird. Für die Quellenanforderung gelten folgende Spezifikationen, die zwingend, während des zu prüfenden Geräts, eingehalten werden müssen:

- Spannungsgenauigkeit  $\pm 2\%$
- Frequenzgenauigkeit  $\pm 0.5\%$
- Phasenwinkelstabilität  $\pm 1.5^\circ$
- $U_{peak} = 1.4 \text{ V} - 1.42 \text{ V}$  Ueff und zwischen  $87^\circ$  und  $93^\circ$  nach dem Nulldurchgang erreicht werden, dies muss jedoch nicht eingehalten werden, sofern Klasse A oder B geprüft wird.
- Die relativen Oberschwingungsanteile der Prüfspannung dürfen folgende Werte nicht überschreiten 0.9 % für die 3. Harmonische Oberschwingung  
0.4 % für die 5. Harmonische Oberschwingung  
0.3 % für die 7. Harmonische Oberschwingung  
0.2 % für die 9. Harmonische Oberschwingung  
0.2 % für die geradzahlige Oberschwingung 2 bis 10 Ordnung  
0.1 % für die Oberschwingung 11 bis 40 Ordnung

Während der Messung werden für jede Oberschwingungsanordnung die Effektivwerte der Oberschwingungsströme in jedem Zeitfenster der diskreten Fouriertransformation (DFT) bestimmt. Diese Werte müssen  $\leq 150\%$  der anwendbaren Grenzwerte sein. Danach wird der arithmetische Mittelwert der in den DFT-Zeitfenstern gemessenen Werte über die gesamte Beobachtungsdauer berechnet. Die erhaltenen Mittelwerte für die einzelnen Oberschwingungsströme müssen kleiner oder gleich den vorgegebenen Grenzwerten sein. Die Beobachtungsdauer wählt man so, dass die Wiederholpräzision der Messung besser als  $\pm 5$  Prozent ist. In der Norm 61000-3-2 sind 4 Geräteklassen definiert, bei denen die Oberschwingungen des Eingangsstromes die Werte nicht überschreiten dürfen. Da es sich bei dem Projekt um symmetrische, dreiphasige ohmsche Lasten handelt fällt dies unter die Klasse A. Dazu kommen folgende Einrichtungen, die die Klasse A beinhaltet:

- Symmetrische dreiphasige Geräte
- Haushaltsgeräte (ausser die, die in Klasse D fallen)
- Elektrowerkzeuge (ausser tragbare Elektrowerkzeuge)
- Beleuchtungsregler (Dimmer) für Glühlampen
- Audio-Einrichtungen

Falls es Geräte gibt, die nicht in die Klassen B bis D fallen, müssen sie automatisch als Geräte der Klasse A definiert werden.

Die Grenzwerte für den Höchstwert des Oberschwingungsstromes für Klasse A Geräte sind wie folgt definiert:

Oberschwingungsordnung $n$	Zuverlässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes A
Ungeradzahlige Oberschwingungen	Geradzahlige Oberschwingungen
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 \times 15/n$
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \times 8/n$

**Tabelle 2.2:** Tabelle Basti

Ein weiterer wichtiger Wert, ist die jeweilige Beobachtungsdauer der Endgeräte. Es wurden 4 verschiedene Arten von Geräteverhalten definiert und dabei die Beobachtungsdauer bestimmt. Dies sieht man in der folgenden Tabelle:

Am Ende der Prüfung muss ein Prüfbericht abgegeben werden, der alle relevanten Informationen zu den Prüfbedingungen, die Beobachtungsdauer der Prüfung sowie die Wirkleistung oder den Grundschwingungsstrom und den Leistungsfaktor beinhalten. Dies gilt auch bei den anderen Normen

Siehe  
Tabelle  
Beobachtungs  
3-2-2 S.18

Ungeradzahlige Harmonische nicht-vielfache von 3		Ungeradzahlige Harmonische Vielfache von 3		Geradzahlige Harmonische	
Oberschwingungs -ordnung $h$	Harmonische Spannung %	Oberschwingungs -ordnung $h$	Harmonische Spannung %	Oberschwingungs -ordnung $h$	Harmonische Spannung %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27x(17/h)-0.27$	$21 < h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25x(10/h)+0.25$

**Tabelle 2.3:** Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemueess

Art des Geräteveraltens	Beobachtungsdauer
quasi-stationär	$T_{obs}$ von ausreichender Dauer, um die Anforderungen zur Wiederholpräzision einzuhalten
kurzer Zyklus ( $T_{cycle} \leq 2.5\text{min}$ )	$T_{obs} \geq 10$ Zyklen (Bezugsverfahren) oder $T_{obs}$ von ausreichender Dauer oder Synchronisation, um die Anforderungen zur Wiederholpräzision einzuhalten <sup>a</sup>
zufällig	$T_{obs}$ von ausreichender Dauer, um die Anforderungen zur Wiederholpräzision einzuhalten
langer Zyklus ( $T_{cycle} > 2.5\text{ min}$ )	voller Programmzyklus des Gerätes (Bezugsverfahren) oder ein repräsentatives 2.5 min -Intervall mit dem höchsten THC angesehen wird

<sup>a</sup> "Synchronisation" bedeutet, dass die gesamte Beobachtungsdauer hinreichend gut eine exakte ganzzahlige Anzahl von Betriebszyklen des Gerätes umfasst, so dass die Anforderungen zur Wiederholpräzision eingehalten wird.

**Tabelle 2.4:** Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemueess

## 2.12.2 EN 61000-3-3

Auch diese Norm wird für Geräte und Einrichtungen mit einem Nenn-Eingangsstrom von bis zu 16 A je Aussenleiter, die zum Anschluss an das öffentliche Niederspannungsnetz vorgesehen sind und keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen angewendet. Ausserdem werden die Spannungsänderungen, die Spannungsschwankungen und die Flicker begrenzt. Falls Geräte und Einrichtungen diese Norm erfüllen, dürfen sie ohne weitere Prüfung an jeden Anschlusspunkt des öffentlichen Netzes angeschlossen werden. Die Nennleistung, welche die Geräte und Einrichtungen aufweisen sollten, sind ohne Einschränkungen kleiner als 11 kW bei Drehstromgeräten, 3.7 kW bei Einphasengeräten und 6.4 kW bei Zweiphasengeräten. Diese Norm trifft man unter anderem beifolgenden Geräten an:

- Haushaltsgeräte und tragbare Elektrowerkzeuge
- Motorbetriebene Geräte (Waschmaschine, Staubsauger, Elektrowärmegerät und Kocheinrichtungen)
- Beleuchtungseinrichtungen
- Automatische elektrische Steuerungen für Hausgebrauch und ähnliche Anwendungen
- Drehzahlgeregelte Antriebe
- Funk-Einrichtungen

Ordnung [m]	50 Hz System	
	Subharmonische Frequenzen fm [Hz]	Um %
		230V
0.2 < m ≤ 0.6	10 < fm ≤ 30	0.5
0.6 < m ≤ 0.64	30 < fm ≤ 32	0.4
0.64 < m ≤ 0.68	32 < fm ≤ 34	0.4
0.68 < m ≤ 0.72	34 < fm ≤ 36	0.3
0.72 < m ≤ 0.76	36 < fm ≤ 38	0.2
0.76 < m ≤ 0.84	38 < fm ≤ 42	0.2
0.84 < m ≤ 0.88	42 < fm ≤ 44	0.2
0.88 < m ≤ 0.92	44 < fm ≤ 46	0.2
0.92 < m ≤ 0.96	46 < fm ≤ 48	0.4
0.96 < m ≤ 1.04	48 < fm ≤ 52	0.6
1.04 < m ≤ 1.08	52 < fm ≤ 54	0.4
1.08 < m ≤ 1.12	54 < fm ≤ 56	0.2
1.12 < m ≤ 1.16	56 < fm ≤ 58	0.2
1.16 < m ≤ 1.24	58 < fm ≤ 62	0.2
1.24 < m ≤ 1.28	62 < fm ≤ 64	0.2
1.28 < m ≤ 1.32	64 < fm ≤ 66	0.3
1.32 < m ≤ 1.36	66 < fm ≤ 68	0.4
1.36 < m ≤ 1.4	68 < fm ≤ 70	0.4
1.4 < m ≤ 1.8	70 < fm ≤ 90	0.5

**Tabelle 2.5:** Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemueess

G Spannungsquelle

M Messeinrichtung

S Prüfungsspannungsquelle, bestehend aus dem Spannungsgenerator G und der Bezugsimpedanz Z mit den Elementen

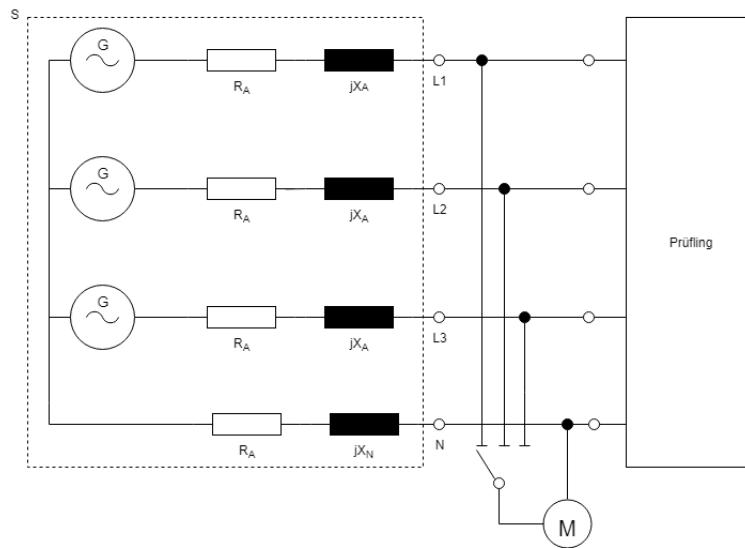
$$R_A = 0.24\Omega \quad jX_A = 0.15\Omega \text{ bei } 50\text{Hz}$$

$$R_N = 0.16\Omega \quad jX_A = 0.10\Omega \text{ bei } 50\text{Hz}$$

- Lichtbogenschweisseinrichtungen
- Medizinische Geräte und Einrichtungen
- Mikrowellengeräte

Unter dem Begriff Elektrische Einrichtung versteht man eine Anlage, welches aus einem oder mehreren voneinander unabhängigen Geräten besteht. Sie bilden dann eine elektrische Einrichtung, wenn nur durch deren Zusammenwirken der bestimmungsgenäss Zweck der Einrichtung erzielt werden kann. Ein Beispiel wäre, bei einer elektrischen Einrichtung, der Treppenlichtautomat und die Glühlampe. Nur der Treppenlichtautomat ohne Beleuchtung erfüllt den technischen Zweck nicht. Ein weiteres Beispiel wäre der motorische Antrieb. Aber auch hier gilt, dass der Motor ohne mechanische Last den technischen Nutzen nicht erfüllen würde. Bei einem elektrischen Gerät handelt es sich zum Beispiel um einen Backofen und die dazu gehörigen einzelnen Kochmodule eines Multifunktions-Herdes.

Die Norm schreibt eine Prüfung der zu beurteilenden Geräten an einer Prüfungsimpedanz vor. Die Impedanz Z ist im unteren Bild ersichtlich und entspricht den folgenden Werten.



**Abbildung 2.9:** Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz

Es gibt bei der Bezugsimpedanz keine Unterscheidung im Anwendungsbereich zwischen Haushaltsgeräten und gewerblich genutzten Geräten. Stattdessen wird die Langzeit-Flickerstärke eingeführt und auf 65 % der Kurzzeit-Flickerstärke begrenzt.

Mit Hilfe des Flickerwertes kann man die Störempfindlichkeit des menschlichen Auges, auf Helligkeitsschwankungen bei der Beleuchtung, durch einen messbaren Wert ermitteln. Dieser Wert ist eine dimensionslose Zahl, welche das Störempfinden des Menschen ausdrückt, wenn er sich mit einer 60W Glühbirne beleuchtet. Die Helligkeit variiert dabei auf Grund von Spannungsschwankungen. Erhält man den Wert 0 so bedeutet dies, dass es am besten ist. Es gibt praktisch keine Schwankungen der Spannungshöhe und somit ist auch kein Flackern der Lampe ersichtlich. Der Flickerwert 1 wurde die Helligkeitsschwankung bei den meisten Versuchspersonen als störend wahrgenommen. Es ist jedoch nicht aussagend, bei einer zu messenden Stelle, eine Person nach ihrer persönlichen empfinden zu befragen, um so einen Flickerwert zwischen 0 und 10 zu erhalten. Die Messwerte würden so Person- und ortsbabhängig sein. Ausserdem wären sie nicht mehr reproduzierbar. Aus diesem Grund setzten sich Forscher mit Studenten als Versuchspersonen zusammen und Beurteilten unterschiedlich flackerndes Licht. Man entwickelte einen Algorithmus und ein entsprechendes Formelwerk für das Durchschnittsempfinden der Erkenntnisse. Nun wurde ein geeignetes Messgerät entwickelt, welches den Flickerwert berechnen konnte. Man nennt dies auch das Flickermessverfahren. Die ausführliche Bestimmung ist in der Norm EN 61000-4-15 beschrieben.

Ein Beispiel zur Erkenntnis der Flickenforscher ist, dass die Frequenz, mit der eine Helligkeitsänderung auftritt, massgeblichen Einfluss auf das Störempfinden hat. Eine Helligkeitsänderung mit einer Frequenz von etwa 8.8 Hz wurde als am störendsten empfunden. Kleiner oder höherer Frequenzen stören dagegen nicht mehr so stark. Daraufhin entwickelte man ein Flickermeter, welches die Abhängigkeit der Empfindung von der Flickerfrequenz, die Abhängigkeit der Helligkeit der Glühlampe von der Spannungshöhe, das Verhalten der Glühbirne selbst und diverse andere Faktoren berücksichtigt. Das Flickmeter liefert alle 10 Minuten einen Wert, der mit Pst bezeichnet wird. Das P steht dabei für perceptibility units = Wahrnehmungseinheiten und  $\beta t$  steht für short time. Der Wert, welcher man behandelt ist also der Kurzzeit-Flickerwert. Die EN 50160 Norm sagt aus, dass man 12 aufeinander folgende Pst-Werte zusammenfassend zu einem Plt-Wert (= long time-Flicker = Langzeit-Flicker) verrechnen kann. Genauer bedeutet dies, dass man die 12 Pst-Werte, die über 2 Stunden gemessen wurden, zusammenrechnet und daraus den

Durchschnitt nimmt. Jeder einzelne Pst-Wert geht mit einer 3. Potenz in die Bewertung ein. Der Plt-Wert ist also der kubische Mittelwert der 12 Pst-Werte.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st,i}^3}{N}} \quad (2.20)$$

Die drei Quellenspannungen G entsprechen der Nennspannung. Alle Spannungen werden auf die Nennspannung  $U_n$  normiert: Der Prüfkreis besteht aus der Prüfspannungsquelle, dem zu prüfenden Gerät (Prüfling) und einer Messeinrichtung z.B. Strommesser, Spannungszange oder einem Flickermeter (M).

relative Spannungsänderung:

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} \quad (2.21)$$

relative Spannungsänderungsverlauf

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.22)$$

relative konstante Spannungsabweichung

$$d_c = \frac{\Delta U_c}{U_n} \quad (2.23)$$

grösste relative Spannungsänderung

$$d_{max} = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} \quad (2.24)$$

relative Spannungsschwankung

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.25)$$

Mit Hilfe dieser Norm können Typenprüfung für bestimmte Geräte vorgenommen werden. Das Ziel dieser Typenprüfung ist es, die Übereinstimmung mit den Grenzwerten festzustellen. Diese werden unter Laborbedingungen an einem Bezugsnetz betrieben. Bei den festgelegten Betriebsbedingungen werden die erzeugten Spannungsschwankungen in Bezug auf die Bezugsimpedanzen gemessen und beurteilt. Falls Geräte die Grenzwerte dieser Norm einhalten, kann davon ausgegangen werden, dass sie zu keinerlei Beschwerden im Netz Anlass geben. Die elektromagnetische Verträglichkeit ist daher gewährleistet.

### 2.12.3 EN 61000-2-2

Die folgende Norm beinhaltet die Festlegung für Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und für Signale von Netz-Kommunikationssystemen in öffentlichen Niederspannungs- und Stromversorgungsnetzen. Die Werte des Verträglichkeitspegel mit ihrer Eigenschaft können für den EMV-Koordinierung von Störaussendungs- und Störfestigkeitsanforderungen für Geräte und als Planungspegel für Stromversorgungsnetze verwendet werden. In der Norm werden folgende Phänomene betrachtet:

- Spannungsschwankungen und Flicker
- Oberschwingungen bis zur 40. Oberschwingungsordnung
- Zwischenharmonische

- Spannungsverzerrungen bei Frequenzen oberhalb der 40. Oberschwingungsordnung
- Spannungseinbrüche
- Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Spannungsunsymmetrien
- Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Transiente Überspannung
- Zweiteilige Schwankung der Netzfrequenz

Gleichanteile und Störgrößen aus der Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsleitungen  
 Wobei man sagen kann, dass einige Punkt, wie zum Beispiel das bestimmen des Flickerwertes oder die Langzeit und die Kurzzeit Flickerstärke, schon in der vorherigen Norm definiert wurde und deshalb hier nicht noch einmal erläutert wird. Die folgende Tabelle zeigt die verschiedenen Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz. Sie ist aber nur in Bezug auf Langzeiteffekte für einzelne harmonische Spannung definiert. Der Wert der gesamten harmonische Verzerrung darf hierbei höchstens einen Wert von THD = 8% betragen. Bei Kurzzeiteffekten wird ein Faktor k zu den harmonischen Ordnungen hinzu multipliziert. Der Faktor wird wie folgt berechnet: Der entsprechende Kompatibilitätsgrad für die gesamte harmonische Verzerrung ist daher THD = 11%. Folgende Tabelle zeigt die erforderlichen Werte in Prozent der subharmonischen Spannung im Niederspannungsnetz bei 230 V, bei einer Frequenz von 10 Hz bis 90 Hz. Sie entsprechen dem Kompatibilitätsgrad bezüglich des Flimmerns. Einige Effekte, die wegen subharmonische Oberschwingung entstehen können sind:

- Unerwünschter Strom, der in die Versorgungsnetze fliesst, welcher zusätzlicher Energieverlust verursacht.
- Subharmonische Spannungen stören den Betrieb von Leuchtstofflampen und anderen elektronischen Geräte, wie zum Beispiel Fernsehempfängern. Jede Verwendung von Strom und Spannungen, bei der die Höhe der Amplitude oder der Zeitpunkt des Nulldurchgangs wichtig ist, kann somit gestört werden, wenn die Kombination der vorhandenen unerwünschten Frequenz diese Eigenschaften der Versorgungsspannung ändern.
- Je grösser der Frequenzbereich ist und je grösser die Amplitude der Spannung bei diesen Frequenzen sind, desto grösser ist das Risiko unvorhersehbare Resonanzeffekte zu erhalten. Sie verstärkt die Spannungsverzerrung der Versorgungsspannung und führen zu einer Überlast oder anderen Störung bei den elektrischen Verbrauchern.
- Ein weiterer Effekt ist das Erzeugen von akustischen Geräuschen. Dies tritt jedoch vor allem bei einem Frequenzbereich von 1 kHz bis 9 kHz auf, bei der die Amplitude 0.5% vom Frequenzwert abweicht und von der Art des beeinflussten Gerätes.

Tabelle

formel

Tabelle

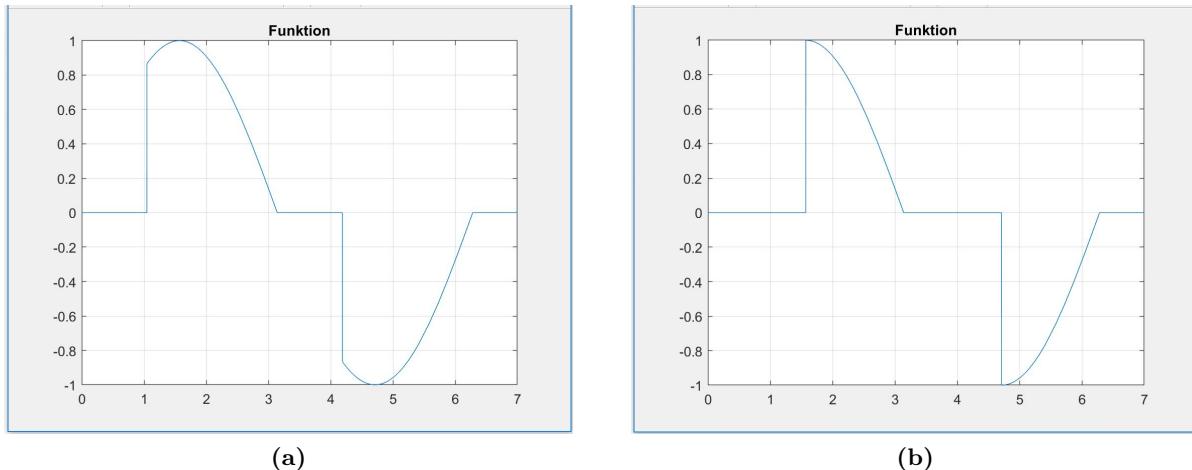
### 3 Simulation

Das folgende Kapitel beinhaltet die Auswertungen der Simulationen, die mit den Tools Plecs und Matlab durchgeführt wurden. Im ersten Teil des Kapitels, simulierte man mit Matlab die zwei bekannten Steuerungsarten, Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung, des einphasigen Steuersignal. Im zweiten Teil führte man die gleichen Verfahren mit Plecs durch. Anschliessend verglich man die Resultate der beiden Simulationen miteinander und konnte so die Richtigkeit der Überlegung und der Modulation bestätigen. Aufgrund dessen konnte mit Plec, das dreiphasige Steuerverfahren und eine Kombination der beiden Systeme im ein- und dreiphasigen System simuliert werden.

#### 3.1 Simulation mit Matlab

Um die einphasige Plecs-Simulationen der Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung zu verifizieren wurde parallel zur Plecs-Simulation das gleiche Verfahren mit Matlab vorgenommen. Mit Hilfe dieser Überprüfung konnte davon ausgegangen werden, dass die Überlegungen sowie der Aufbau der Plec-Simulation stimmt und somit ohne weiteres bedenken das dreiphasige Vorgehen der zwei Verfahren mit Plecs verwirklichen kann. Im folgenden Abschnitt wird nun aufgezeigt, welche Überlegungen man bei den Matlabfunktionen vorgenommen hat und wie die Ergebnisse zustande kamen.

Die ersten Funktionen, die man simulierte, waren periodische Sinusfunktionen im Zeitbereich mit verschiedenen Phasenanschnitten. Die Periodenlänge definierte man dabei auf  $2\pi$  und die Amplitude des Sinus auf  $\pm 1$ . Der Winkel des Phasenanschnittes wurde mit verschieden, geläufigen Werten wie zum Beispiel  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  oder  $120^\circ$  betrachtet. In den Abbildungen 3.1a erkennt man die Sinusfunktionen mit einem Phasenanschnitt von links 3.1a  $60^\circ$  und rechts 3.1b  $90^\circ$ . Weitere Funktionen mit den anderen Winkeln sind im Anhang ersichtlich.

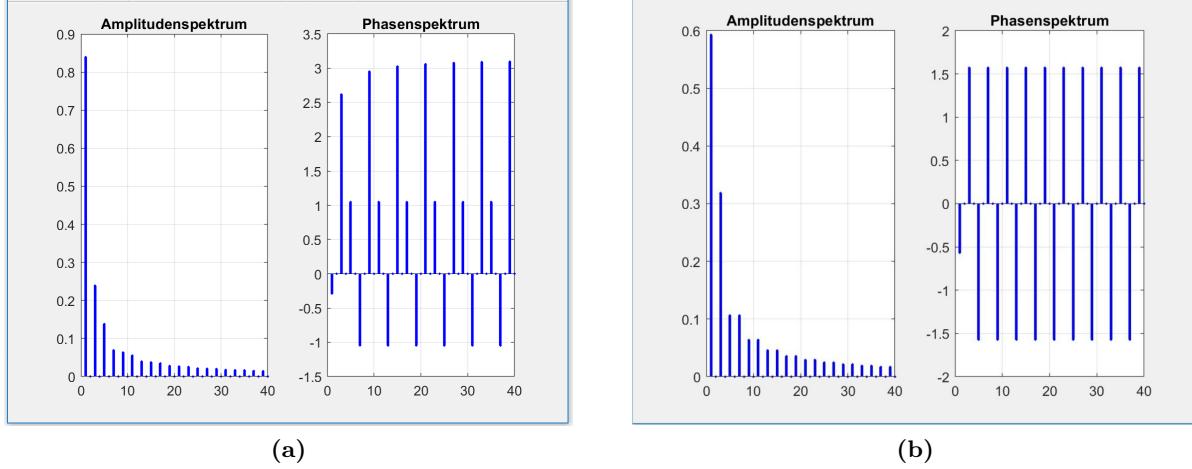


**Abbildung 3.1:** Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a)  $60^\circ$  (b)  $90^\circ$

Als nächstes nahm man die Zerlegung der Funktion in verschiedene Frequenzanteile vor. Dies wird auch als Fourier-Analyse bezeichnet. Man berechnete zuerst die Fourier-Koeffizienten  $a_0$ ,  $b_n$  und  $a_n$  und konnte danach mit den folgenden Formeln das Amplituden- und Phasenspektrum berechnen.

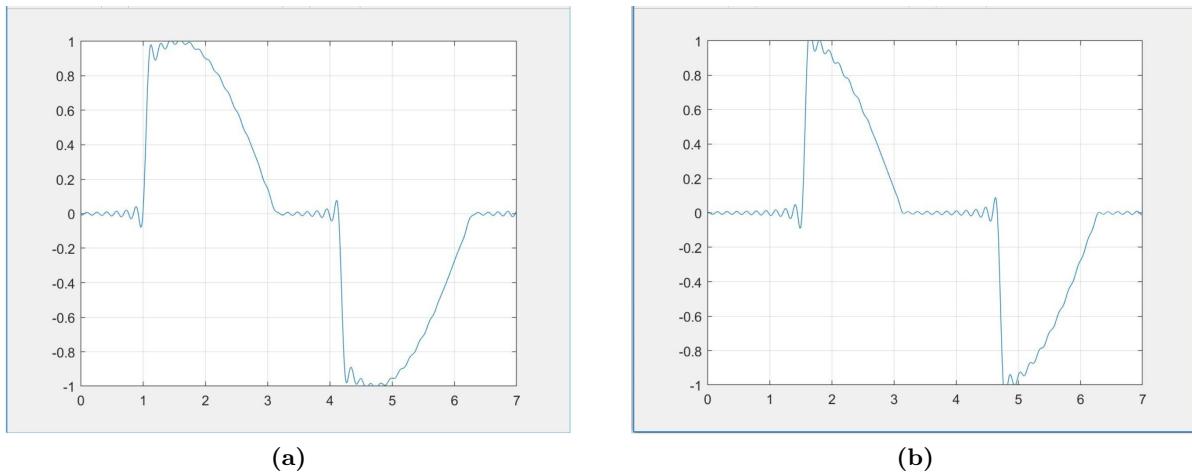
Die Darstellung im Zeitbereich beziehungsweise im Frequenzbereich sind äquivalent, sie enthalten also die vollständige Information über die Funktionen. Im Spektrum benutzt man die vertikalen Linien, um die Frequenzkomponenten anzugeben. Die x-Achse ist somit die Frequenz

der Frequenzkomponente und die y-Achse zeigt die Länge der Amplitude an. In den untenstehenden Grafiken 3.2 erkennt man das Amplituden- und Phasenspektrum des in Abbildung 3.1 dargestellten Signale.



**Abbildung 3.2:** Amplituden- und Phasenspektrum (a)  $60^\circ$  (b)  $90^\circ$

Zur Überprüfung der Berechnungen und der Darstellung des Amplituden- und Phasenspektrum, wurde mit diesen zwei Spektren das Eingangssignal rekonstruierte. Die Signale erkennt man auf der nächsten Abbildung 3.3. Es ist ersichtlich das die Rundung des Sinus nicht genau dem, des eigentlichen Signal entsprechen 3.1. Dies kommt davon, dass man die Funktion in «nur» 40 Frequenzanteile unterteilt hat. Würde man eine grössere Anzahl Anteile verwenden, so könnte das Rauschen verkleinert werden. Da man jedoch nur einen ungefähren Vergleich der beiden Funktionen haben möchte, reicht diese Anzahl völlig aus.



**Abbildung 3.3:** Rekonstruiertes Signal (a)  $60^\circ$  (b)  $90^\circ$

Nach dem man das Phasenanschnittsignal, das Amplitudenspektrum, das Phasenspektrum und das rekonstruierende Eingangssignal von Hand berechnet und geplottet hat, überprüfte man mit Hilfe der FFT-Funktion (Fast Fourier Transform) von Matlab die Werte und die Grafiken. In der folgenden Abbildung 3.4 erkennt man die Plots bei einem Winkel von  $60^\circ$ . Bei dem Amplituden- und Phasenspektrum wurde die x-Achse so normiert, dass die Werte ein Vielfaches der Grundfrequenz von 50 Hz sind. So ist zum Beispiel der Wert bei 500 beim FTT zu vergleichen mit dem Wert 10 bei den Spektren die von Hand berechnet wurde.

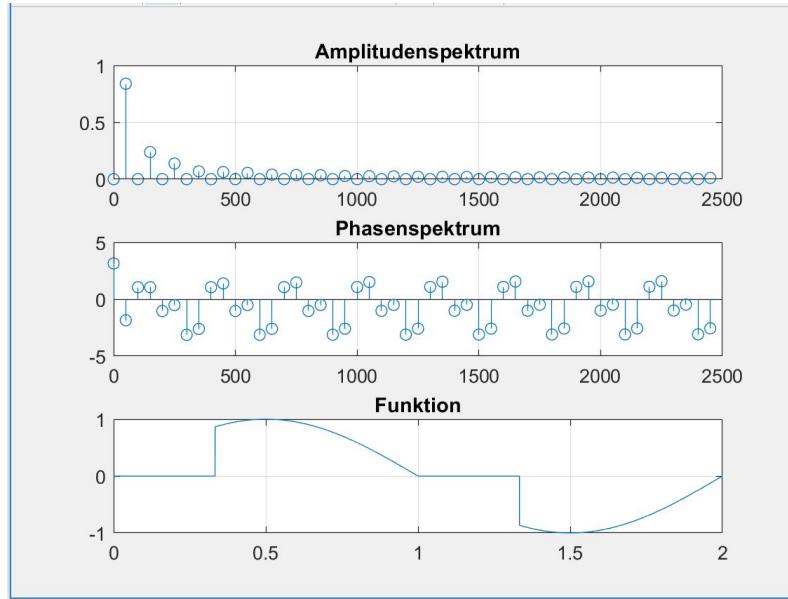


Abbildung 3.4: FFT mit Hilfe der Matlabfunktion

Bei der zweiten Funktion, die zu überprüfen und simulieren war, handelte es sich um eine Schwingungspaketsteuerungen. Die komplette Paketdauer beträgt bei den abgebildeten Funktionen 20 Halbwellen 3.5. Es wurden nun verschiedene Einschaltverfahren untersucht. In der Grafik erkennt man links 3.5a einen duty cycle von 0.5, es sind dementsprechend immer 10 Halbwellen ausgeschaltet und die anderen 10 eingeschaltet. Auf der rechten Seite 3.5b beträgt der Wert des duty cycle 0.8. Es sind also zuerst 4 Halbwellen ausgeschaltet und die restlichen 16 Halbwellen werden angesteuert. Für einen sinnvollen Vergleich mit der Plec-Simulation untersuchte man 5 Schwingungspakete. Die Leistungen der rechten Funktion ist somit  $1/2$  und die der linken  $8/10$  so gross wie die der normalen Netzspannung.

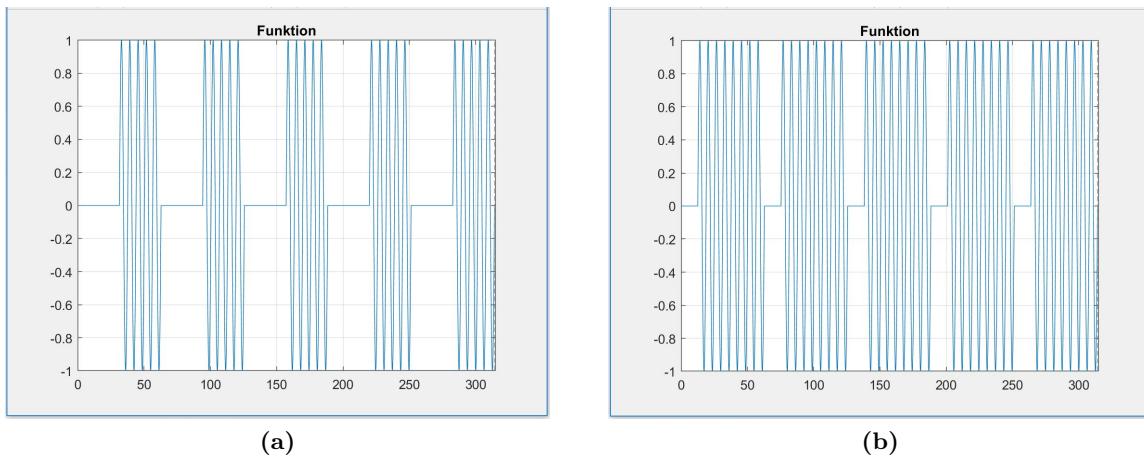
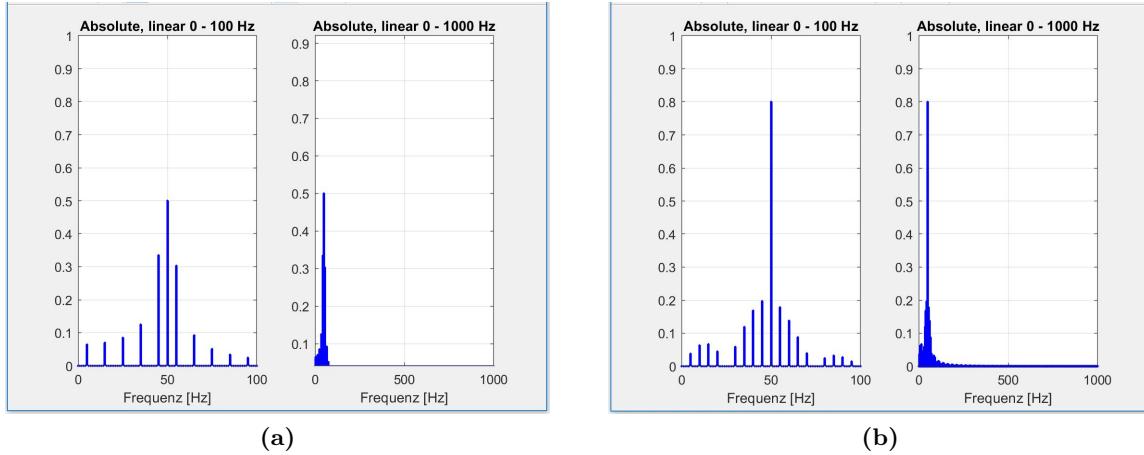


Abbildung 3.5: Schwingungspaket mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

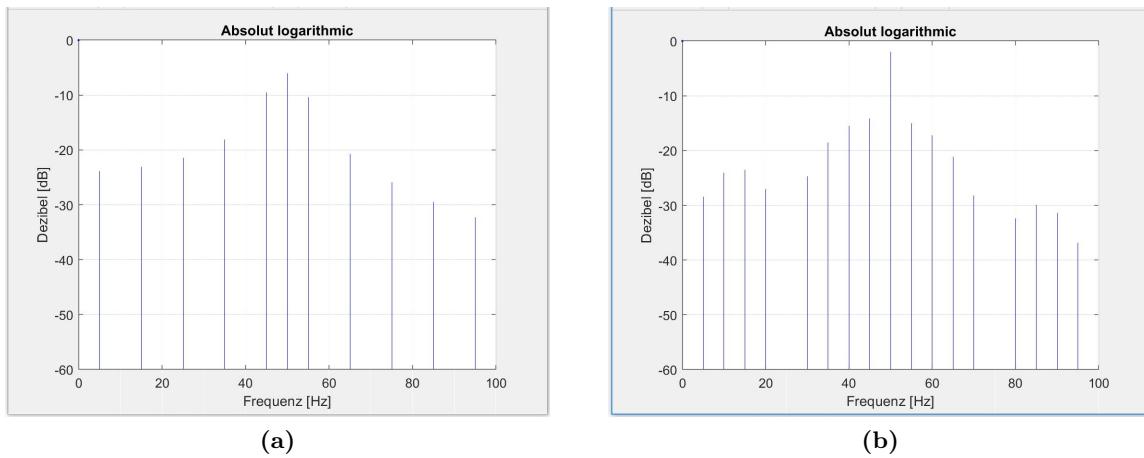
Um auch hier die Plecs-Simulation zu überprüfen, stellte man das absolute lineare Spektrum dar 3.6. Die unteren Abbildungen zeigen die Spektren, links mit einem duty cycle von 0.5 3.6a und rechts mit einem von 0.8 3.6b. Interessant sind da vor allem die Subharmonischen Schwingungen, welche sich unterhalb der Grundfrequenz von 50 Hz befinden. Sie sind jeweils auf der linken Seite der Grafiken veranschaulicht. Damit man einen besseren Überblick über die Oberschwingungen

erhält, wurde das Spektrum bis auf 1000 Hz erweitert. Dies ist auf der rechten Seite des jeweiligen Bildes ersichtlich. Vergleicht man die zwei Bilder erkennt man, dass je höher der duty cycle ist, desto höher ist der Peak-Wert bei der Grundfrequenz von 50 Hz.



**Abbildung 3.6:** Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

Schlussendlich untersuchte man noch den absoluten Logarithmus der beiden Funktionen. Die ist in der Abbildung 3.7 zu erkennen. Die y-Achse zeigt das Verhältnis der Spannungen an, dies wird immer in Dezibel angegeben. Bei der x-Achse handelt es sich um die Frequenz welche man untersucht hat. Auch hier wurde der absolute Logarithmus mit den zwei duty cycle 0.5 3.7a und 0.8 3.7b untersucht.



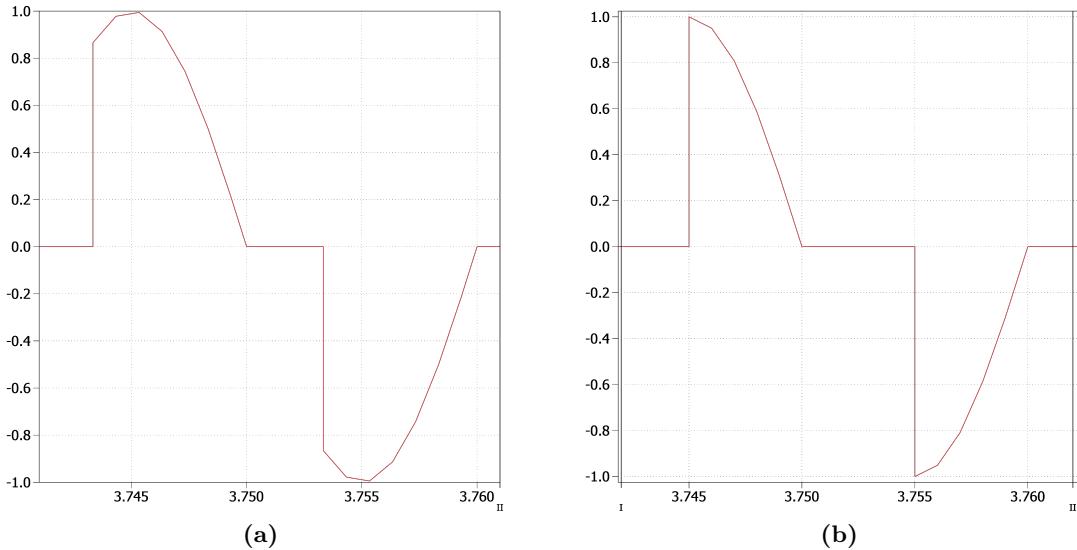
**Abbildung 3.7:** Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

## 3.2 Simulation mit Plecs

Mit dem Simulationsprogramm Plecs konnte man alle gewünschten Ansteuerungen simulieren. Die einphasigen Simulationen der Phasenanschnitt- und der Schwingungspaketsteuerung wurden mit den Matlab-Funktionen verglichen und so auf ihre Richtigkeit überprüft. Nachdem man dies verifiziert hat, stellte man Verfahren für den dreiphasigen Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung her. Außerdem konstruierte man Kombinationen der beiden Verfahren im einphasigen und dreiphasigen System. Die Resultate sind auf den folgenden Seiten aufgezeigt.

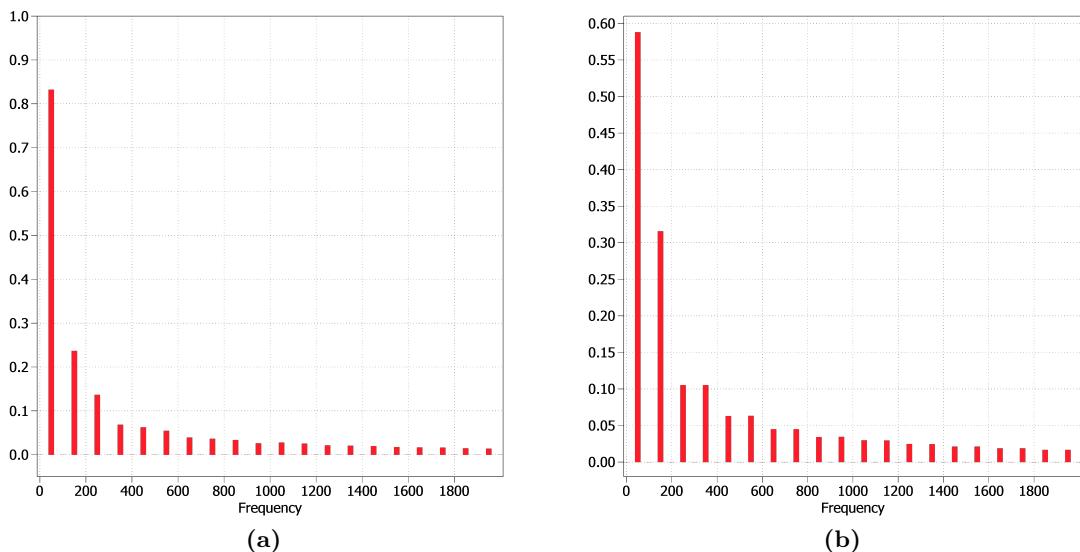
alle Verfahren auflisten

Auch bei der Plecs-Simulationen wurde als erstes die Phasenanschnittsteuerung untersucht. Gleich wie bei der Matlab-Simulation konnten die verschiedenen Winkel des Anschnittes nach Belieben eingestellt werden. Um die Resultate verifizieren zu können wählte man die selben Winkel wie in der Abbildung 3.1. In der unteren Grafik, erkennt man ein Sinussignal mit einem Phasenanschnitt von  $60^\circ$  3.8a und einen mit  $90^\circ$  3.8b. Um die Spektren mit den Matlab-Simulationen vergleichen zu können wurde die Amplitude des Sinussignales wieder auf  $\pm 1$  eingestellt.



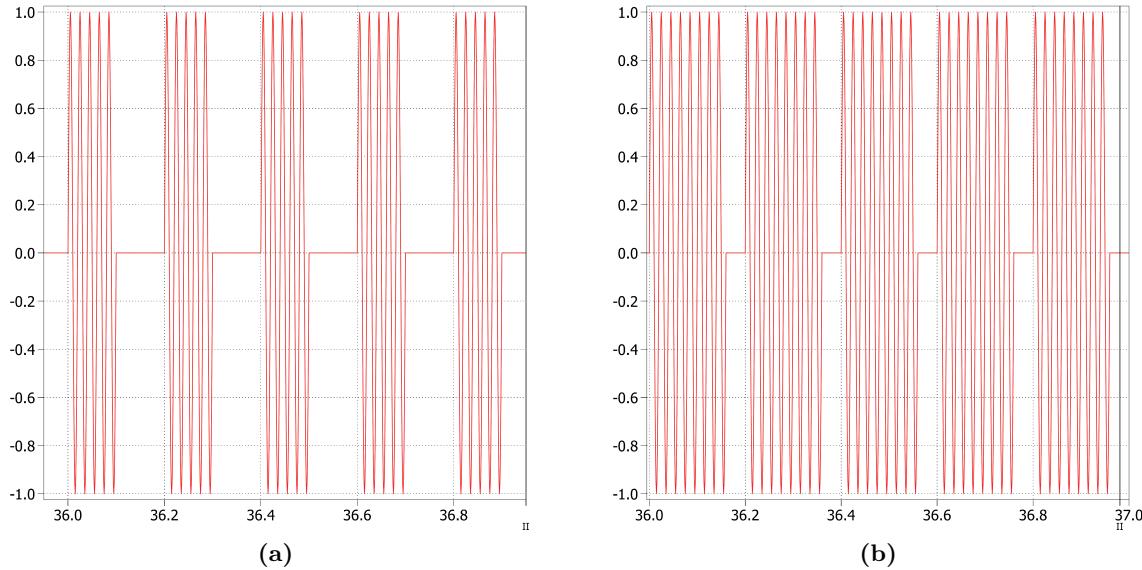
**Abbildung 3.8:** Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a)  $60^\circ$  (b)  $90^\circ$

Die folgenden Bilder 3.9 zeigen das Amplitudenspektrum der Phasenanschnittsteuerung mit den zwei bereits verwendeten Winkeln. Die Grafik musst nicht wie bei der Matlab-Funktion von Hand berechnet, sondern konnte mit Hilfe des Plecs Scope direkt analysiert werden. Plecs macht auch eine Fourier-Analyse um das Spektrum anzuzeigen. Vergleicht man die Amplitudenspektren der beiden Simulationen miteinander sehen die Grafiken, nach erster Einschätzung von Auge, sehr ähnlich aus. Der genau Vergleich der Werte wird weiter unten im Kapitel XX beschrieben.



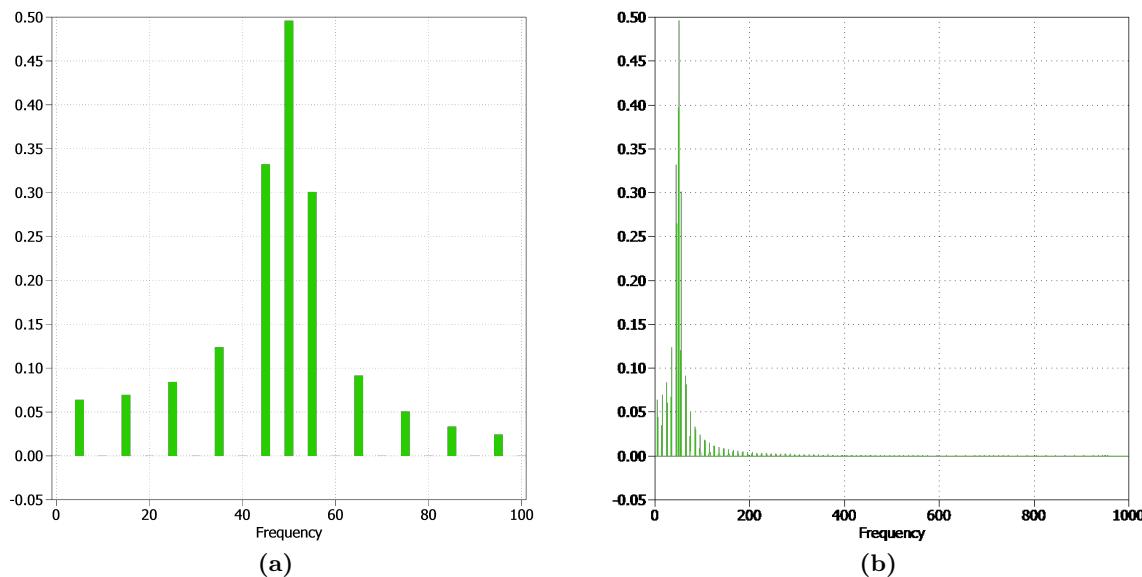
**Abbildung 3.9:** Amplitudenspektrum (a)  $60^\circ$  (b)  $90^\circ$

Als nächstes wurde eine Simulation für die Schwingungspaketsteuerung aufgebaut. Auch hier verwendete man einen duty cycle von 0.5 3.10a beziehungsweise 0.8 3.10b. Die untere Abbildung 3.10 zeigt beiden Signale.



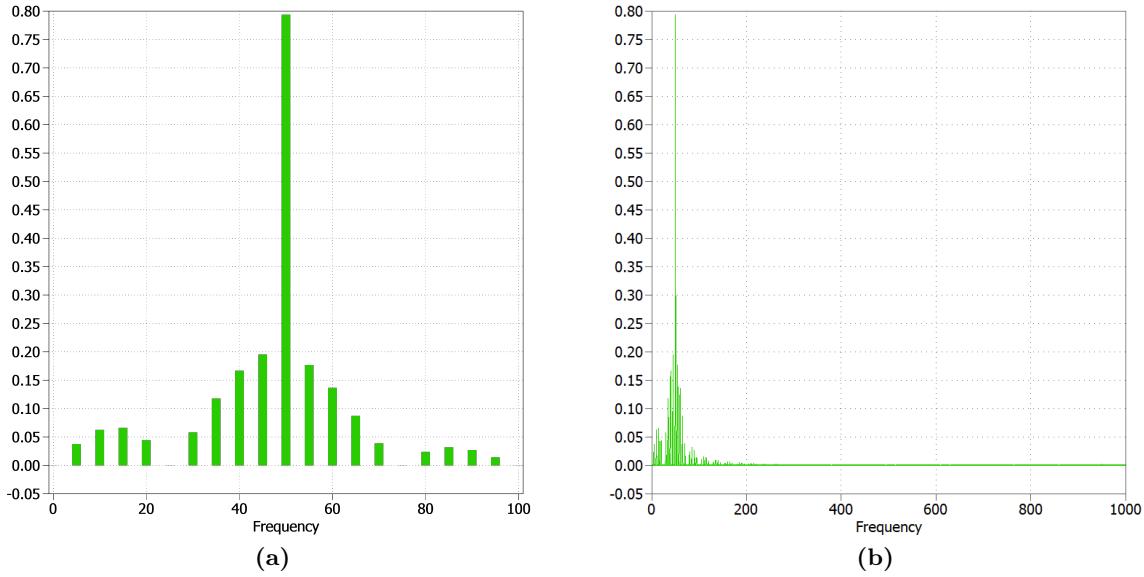
**Abbildung 3.10:** Schwingungspaket mit einem duty cycle (a) 0.5 (b) 0.8

In der folgende Abbildung 3.11 wurde das Amplitudenspektrum des Schwingungspaketes mit einem duty cycle von 0.5 dargestellt. Auf der linken Seite 3.11a der Abbildung erkennt man das bekannte Spektrum von 0- 100 Hz mit den Subharmonischen Werten unterhalb von 50 Hz. Rechts 3.11b davon ist das Spektrum bis zu 1000 Hz erweitert worden. Auch hier ist eine optische Ähnlichkeit zur Matlab-Funktion ersichtlich.



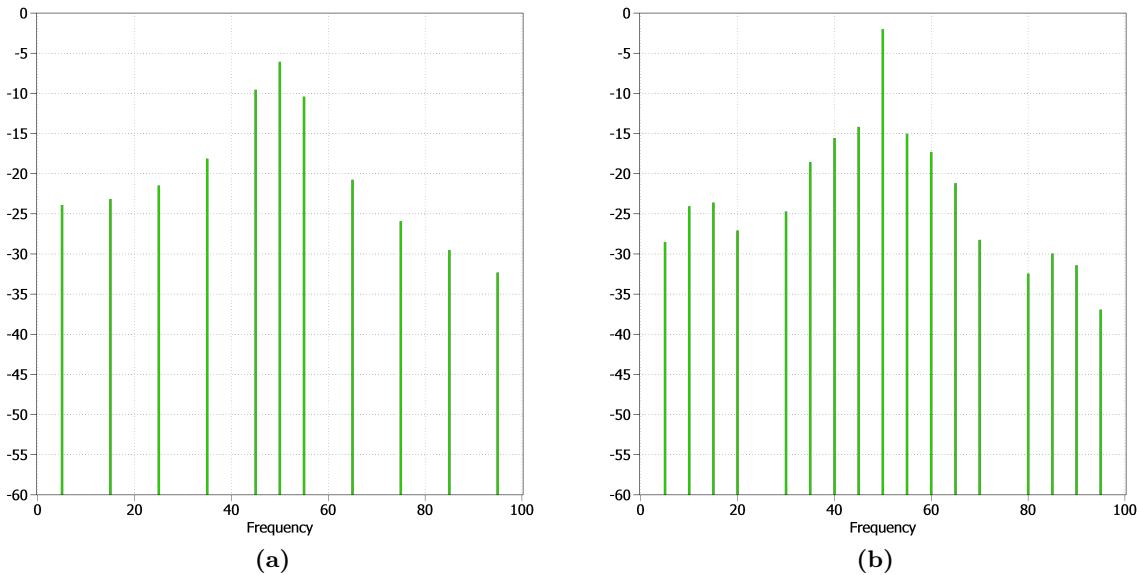
**Abbildung 3.11:** Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz

Anschliessend wurde das gleiche noch mit dem duty cycle von 0.8 3.12 realisiert. Links 3.12a wieder mit einer Frequenz von 0 - 100 Hz und rechts 3.12b das Spektrum bis 1000 Hz.



**Abbildung 3.12:** Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.8 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz

Letztlich wurde noch das lineare absolute Spektrum mit den beiden duty cycle 0.53.13a und 0.83.13b veranschaulicht. Damit man die Grafiken mit der Matlab-Simulation vergleichen konnte, entschied man sich das Spektrum nur bis zu einer Frequenz von 100 Hz anzuzeigen. Auch hier erkennt man eine Ähnlichkeit zur Matlab-Simulation.



**Abbildung 3.13:** Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

### 3.2.1 Alternative Ansteuerungen

In der Praxis werden nicht immer alle 3 Phasen angesteuert, sogenannte Sparansteuerungen. Dabei können nur zwei oder auch nur eine Phase angesteuert werden. Das heisst, dass zum Beispiel bei der Zwei-Phasen-Ansteuerung bei einer Phase der Thyristor überbrückt wird beziehungsweise der Thyristor gar nicht vorhanden ist. Dabei dient die überbrückte Phase als Ausgleichs- und Rückleiter. Diese Fälle wurden mit Plecs simuliert wobei die Last in Stern und in Dreieck geschaltet werden kann. Wie bei der 3-Phasen Ansteuerung, wurde für die alternativen Ansteuerung auch der Sanft-Anlass, die Kombination mit Phasenanschnitts- und Schwingungspaketsteuerung, simuliert.

#### 2-Phasen Ansteuerung mit Last in Stern

Bild Simulation

#### 2-Phasen Ansteuerung mit Last in Dreieck

Bild Simulation

#### 1-Phasen Ansteuerung mit Last in Stern

Bild Simulation

#### 1-Phasen Ansteuerung mit Last in Dreieck

Bild Simulation

#### Halbwellensteuerung

Eine weitere Möglichkeit, die Thyristoren anzusteuern, ist die Halbwellensteuerung. Dabei wird die positive Halbwelle einer Phasen und zwei negative Halbwellen der anderen Phasen auf die Last geführt. Dies ist mit dem Thyristorsteller, welcher für das Projekt benutzt wurde nicht möglich, da dieser alle 3 Phasen gleich ansteuert. Deshalb wurde dieser Fall nur mit Plecs simuliert. Das Problem bei dieser Steuerung ist, dass wenn der Sternpunkt nicht mit dem Nullpunkt verbunden ist, der Phasenverlauf im Plecs schwer zu kontrollieren ist. Da die Summe der Spannungen immer 0 geben muss und die Spannungen phasenverschoben sind gibt es einen sehr unschönen Spannungsverlauf. Wenn das FFT analysiert wird, fällt schnell auf, dass die Grundschwingung von 50 Hz nicht den höchsten Peak hat.

Einfügen  
Bild Simulation

## 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 Umsetzung

### 5.1 Laboraufbau

Um die Simulationen in die Praxis umzusetzen, wurde ein “T-Drive 3Ph compact Thyristorsteller“ von der Firma Chemtronic, vom Dozenten zur Verfügung gestellt. Wie der Name des Produktes schon sagt, arbeitet dieser Thyristorschaltung mit 3 Phasen. Für die Ansteuerung des Zündwinkels kann ein Potenziometer benutzt werden, dies hat jedoch den Nachteil, dass der Zündwinkel von Hand umgestellt werden muss. Jedoch kann die Ansteuerung auch über ein Spannungssignal von 0V - 10V benutzt werden. Um dieses Spannungssignal erzeugen zu können, wurde ein Arduino Mega 2560 verwendet. Das Problem dabei ist, dass der Arduino nur eine Ausgangsspannung von 5V erzeugen kann. Deshalb wurde eine Spannungsverstärkungsschaltung designt, welche die Spannung verdoppelt. Um die variable Spannung zu erzeugen, wurde im Arduino die PWM-Funktion genutzt. Diese läuft mit einer Frequenz von 490 Hz. Für die Ansteuerung sollte aber eine reine DC-Spannung geliefert werden. Deshalb wurde zusätzlich ein Tiefpass-Filter erster Ordnung am Ausgang des Arduinos eingebaut, mit einer Cut-off Frequenz von 1 Hz.

#### 5.1.1 Filter

Um die Elemente des Tiefpassfilters zu berechnen, wurde folgende Formel verwendet.

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (5.1)$$

Dabei wurde  $f = 1\text{Hz}$  eingesetzt und so kann die Kapazität oder der Widerstand frei gewählt werden. Für die Kapazität wurde  $10\mu\text{F}$  ausgesucht. Somit ergab sich einen Widerstand von  $16\text{k}\Omega$ .

#### 5.1.2 Verstärkerschaltung

Die Verstärkung einer nicht invertierenden Verstärkungsschaltung wird wie folgt berechnet.

$$V_u = 1 + \frac{R_3}{R_2} \quad (5.2)$$

Um die Ströme klein zu halten, wurden Widerstände von  $12\text{k}\Omega$  ausgewählt. Um eine Verstärkung von zwei zu erreichen, wurden die beiden Widerstände gleich gross gewählt.

Diese Schaltung wurde zusätzlich noch im Plecs simuliert.

evt. einfü-  
gen grafik  
Plecs

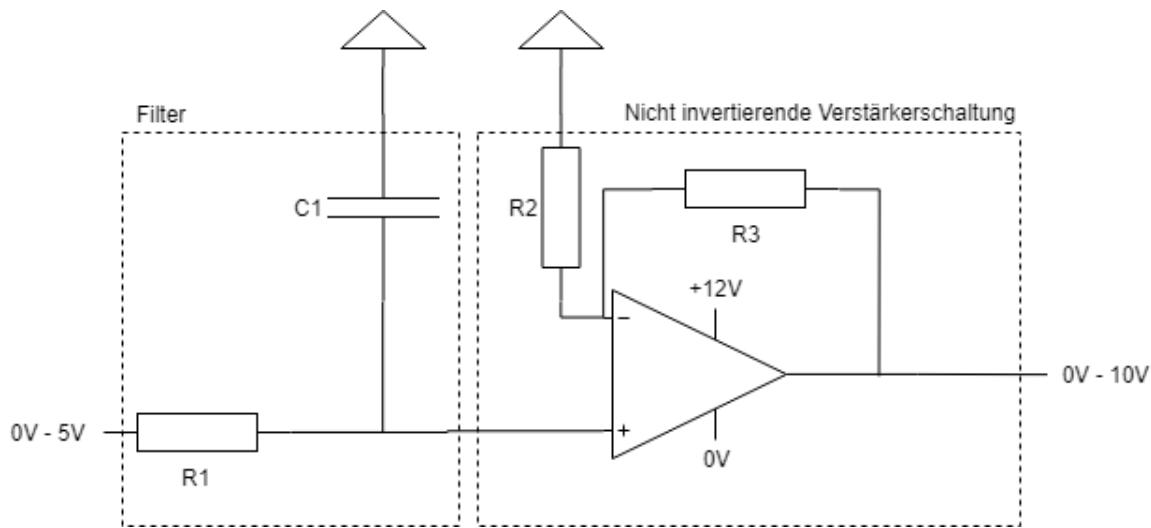


Abbildung 5.1: Schema Verstärkerschaltung

Werte:

R <sub>1</sub>	16kΩ
R <sub>2</sub>	12kΩ
R <sub>3</sub>	12kΩ
C <sub>1</sub>	10μF

Tabelle 5.1: Werte der Bauteile

Nach dem Aufbau der Verstärkerschaltung wurde die Ausgangsspannung bei einem duty-cycle von 1 gemessen. Dabei wurde ein Wert von 9.885V gemessen. Dies bedeutet das der Thyristorsteller nicht voll ausgesteuert werden kann. Deshalb wurde bei der Verstärkerschaltung die Verstärkung erhöht.

$$\frac{12k\Omega}{11k\Omega} = 1.09 \quad (5.3)$$

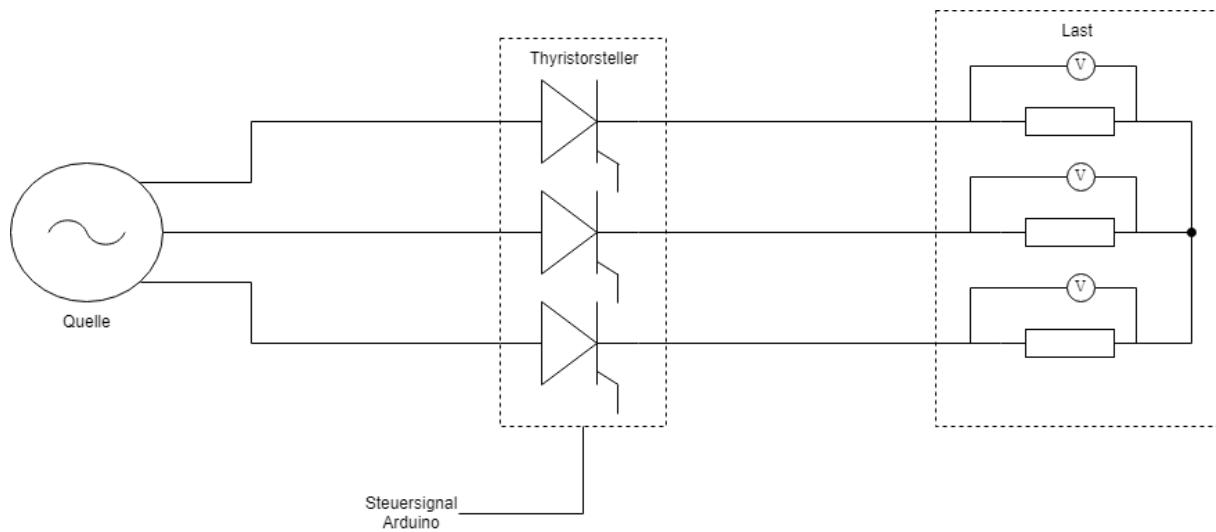
Dies resultiert in eine Verstärkung von:

$$V_u = 1 + \frac{12k\Omega}{11k\Omega} = 2.09 \quad (5.4)$$

Nach dem Einbau des neuen Widerstandes wurde eine Spannung von 10.2V am Ausgang gemessen. Somit kann der Thyristorsteller voll ausgesteuert werden.

## 5.2 Laboraufbau mit Widerstand

Nach dem Feststellen der Funktionalität der Spannungsverstärkungsschaltung konnte mit dem Laboraufbau begonnen werden. Hierzu wurde ein variabler Culatti-Widerstand als Last benutzt. Dieser hat den Vorteil das die Last bei allen Phasen symmetrisch ist. Um den Strom klein zu halten, wurde ein Widerstand von 150Ω gewählt. Der Aufbau der Messschaltung ist auf der Abbildung 5.2 ersichtlich.



**Abbildung 5.2:** Schema Messaufbau

Um zu analysieren wie sich die Spannung bei der Last in Dreieck verläuft, konnte die Last auch in Dreieck geschaltet werden.

### 5.3 Arduino

Das Arduino-Programm, welches den Thyristorsteller ansteuert, wurde mit der Arduinosoftware geschrieben. Dabei werden die Steuerungsspannung mit einem PWM generiert. Dieser fährt mit einer for-Schleife von 0V bis 5V hoch. Danach bleibt der PWM für eine Zeit auf dem Maximum und fährt dann wieder runter. Zusätzlich wurde eine for-Schleife gemacht, welche die Schwingungspaketsteuerung macht. Dazu werden eine gewisse Anzahl vom PWM eingeschaltet und andere werden gesperrt.

Code in  
Anhang

#### 5.3.1 Schwingungspaketsteuerung mit Arduino

#### 5.3.2 Phasenanschnittssteuerung mit Arduino

## 5.4 Messungen

### 5.4.1 Schwingungspaketsteuerung mit Last in Stern

Für die Messung mit der Schwingungspaketsteuerung wurde eine Einschaltzeit von 0.5 Sekunden und eine Ausschaltzeit von 0.2 Sekunden gewählt. Die Ausschaltzeit darf nicht kürzer sein, da die Spannungsverstärkerschaltung und den Thyristorsteller eine Zeitverzögerung darstellen und so die Spannung nicht sofort ein- oder ausgeschaltet wird. Wenn die Ausschaltzeit kürzer ist, geht die Spannung zwischen den Paketen nicht auf 0.

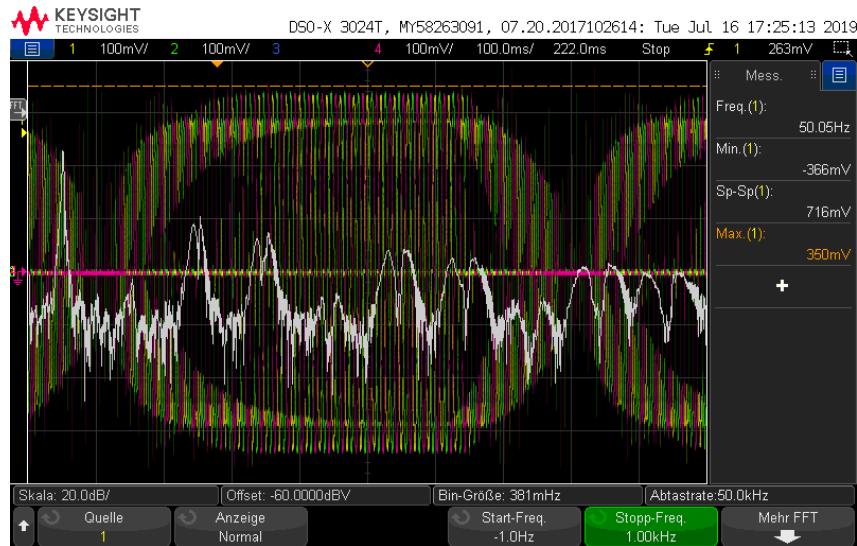


Abbildung 5.3: Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT

Das FFT zeigt entgegen den Erwartungen aus der Theorie fast keine Subharmonische auf. Dafür sind Harmonische und Zwischenharmonische sehr ausgeprägt. Sehr gut zu sehen ist die Grundfrequenz von 50 Hz, der erste Peak von der linken Seite. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht direkt ein- und ausgeschaltet wird und so einem Sanft-Anlass ähnelt. Dies dominiert gegenüber dem harten Ein- und Ausschalten, welches die Subharmonische hervorrufen würde.

## 5.5 Phasenanschnittsteuerung mit 2 Thyristoren mit Last in Stern

Für die Sparansteuerung wurde ein Winkel von 90° gewählt.

## 6 Validierung

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

## 7 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] Alexander Kamenka. (2019). OBERSCHWINGUNGEN KAPITEL 1: OBERSCHWINGUNGEN – DIE GRUNDLAGEN, Adresse: <https://www.ihks-fachjournal.de/sechsthemen-um-overschwingungen-und-netzqualitaet-in-stromversorgungsnetzen/> (besucht am 4. Mai 2019).
- [4] C.Beneduce, *Analysis 3, Vorlesungsscript Teil 3*, 6. 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	Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung	4
2.5	Grundschwingung mit 3. Ordnung [3]	6
2.6	Grundschwingung mit 11. Ordnung [3]	6
2.7	Addition der verschiedenen Oberwellen [4]	7
2.8	Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz	11
2.9	Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz	15
3.1	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) $60^\circ$ (b) $90^\circ$	19
3.2	Amplituden- und Phasenspektrum (a) $60^\circ$ (b) $90^\circ$	20
3.3	Rekonstruiertes Signal (a) $60^\circ$ (b) $90^\circ$	20
3.4	FFT mit Hilfe der Matlabfunktion	21
3.5	Schwingungspaket mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	21
3.6	Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	22
3.7	Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	22
3.8	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) $60^\circ$ (b) $90^\circ$	24
3.9	Amplitudenspektrum (a) $60^\circ$ (b) $90^\circ$	24
3.10	Schwingungspaket mit einem duty cycle (a) 0.5 (b) 0.8	25
3.11	Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz	25
3.12	Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.8 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz	26
3.13	Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	26
5.1	Schema Verstärkerschaltung	30
5.2	Schema Messaufbau	31
5.3	Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT	32

**Tabellenverzeichnis**

2.1	Oberschwingungsfrequenzen . . . . .	6
2.2	Tabelle Basti . . . . .	13
2.3	Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemuess . . . . .	13
2.4	Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemuess . . . . .	14
2.5	Sorry weiss nömmme wo die Tabelle anemuess . . . . .	14
5.1	Werte der Bauteile . . . . .	30

## A Matlab-Berechnungen

### A.1 Leistungsfaktor

```
1 %Leistungsfaktor
2 %Phasenanschnitt
3 clc, clear all, close all hidden
4 alpha= linspace(0, 180, 180);
5 alpha1= deg2rad(alpha);
6 ProzentAlpha= alpha1/(pi)*100;
7
8 lambda_prov= sqrt(1-alpha1/pi+1/(2*pi)*sin(2*alpha1));
9 lambda_p= real(lambda_prov);
10 VP = 1-alpha1/pi+1/(2*pi)*sin(2*alpha1);
11 hold on
12 subplot(1,2,1)
13 plot(lambda_p)
14 axis([0 180 0 1])
15 grid on
16
17 title('Phasenanschnitt')
18 xlabel('Zuendwinkel in Grad')
19 ylabel('Leistungsfaktor')
20
21 % Schwingungspaketsteuerung
22 a= linspace(0.001, 1, 100);
23
24 lambda_s= sqrt(a);
25 subplot(1,2,2)
26 plot(lambda_s)
27 grid on
28 %axis([0 1 0 1])
29 title('Schwingungspaket')
30 xlabel('Einschaltzeitverhaeltnis [%]')
31 ylabel('Leistungsfaktor')
```