

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

1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Auftretende von verzerrten Sinusschwingungen	2
2.2 Oberschwingungen	2
2.3 Verzerrte Schwingung	3
2.4 Vorkommen der Oberschwingungen	5
2.5 Auswirkung von Oberschwingungen	5
2.6 Zwischen- und Subharmonische Schwingungen	7
2.7 Phasenanschnittsteuerung	8
2.8 Schwingungspaketsteuerung	9
2.9 Leistungsfaktor	10
2.9.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung	11
2.9.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung	12
2.10 Anforderung an die Netzqualität	12
2.11 Gegenmassnahmen bei Oberschwingungen	12
2.11.1 Vermeidung von Störungen	12
2.11.2 Stromnetzeigenschaften	13
2.11.3 Oberschwingungsfilter	13
2.11.4 Änderung der Energieversorgung	13
2.11.5 EMV verträgliche Gebäudeinstallation	13
2.12 Normen	14
2.12.1 EN 61000-3-2	14
2.12.2 EN 61000-3-3	17
2.12.3 EN 61000-2-2	19
3 Simulationen	21
3.1 Simulation mit Matlab	21
3.1.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60°und 90°	21
3.1.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle von 0.5 und 0.8	24
3.2 Simulation mit Plecs	26
3.2.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60 ° und 90 °	26
3.2.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle von 0.5 und 0.8	27

3.2.3	Vergleich der einphasigen Resultate mit Plecs und Matlab	29
3.2.4	Dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°	30
3.2.5	Dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cyclen von 0.5 und 0.8	32
3.2.6	Einphasige Kombination des Sanft-Anlassen	33
3.2.7	Dreiphasige Kombination des Sanft-Anlassen	34
3.2.8	Alternative Ansteuerungen	35
4	Messaufbau	36
5	Umsetzung	37
5.1	Laboraufbau	37
5.1.1	Filter	37
5.1.2	Verstärkerschaltung	37
5.2	Laboraufbau mit Widerstand	38
5.3	Arduino	38
5.3.1	Schwingungspaketsteuerung mit Arduino	39
5.3.2	Phasenanschnittssteuerung mit Arduino	39
5.4	Messungen	40
5.4.1	Schwingungspaketsteuerung mit Last in Stern	40
5.5	Phasenanschnittsteuerung mit 2 Thyristoren mit Last in Stern	41
5.6	Phasenanschnittsteuerung mit 1 Thyristor mit Last in Stern	41
6	Validierung	42
7	Schlusswort	43
Literatur		45
Abbildungsverzeichnis		45
Tabellenverzeichnis		47
A	Matlab-Berechnungen	48
A.1	Leistungsfaktor	48
A.2	Arduino-Programm	49
B	Vergleich der Resultate von Plecs und Matlab	50

1 Einleitung

In der Leistungselektronik sind ein- und dreiphasige Thyristorsteller seit Jahren beliebte Methoden für die Ansteuerungen von verschiedene Verbrauchern. Die Phasenanschnitt-Steuerung ist eine geläufige Vorgehensweise um die Leistung von ohmsche Lasten zu regulieren. Da bei dieser Steuerung jedoch Harmonische Schwingungen (Vielfaches der Netzfrequenz) auftreten, sind ihr vom Netzbetreiber einige Grenzen gesetzt. Ein Beispiel dafür ist die Amplitude der Harmonischen Schwingungen, bei verschiedenen Gerätgruppen. Eine andere Möglichkeit die verwendet wird, um Spannung und Strom zu regulieren, ist eine Schwingungspaket-Steuerung. Die Leistung wird dabei während mehreren Netzperioden voll bezogen und dann wieder weggeschaltet. Dieses strikte Zu- und Wegschalten des Verbrauchers vom Netz, erzeugen neben den Harmonischen, auch Subharmonische Schwingungen (Bruchteile der Netzfrequenz). Die beiden Effekte sind im Netz unerwünscht, da diese die ordnungsmässige Funktion der Betriebsmittel beeinträchtigen. Eine weitere Variante die die oben genannten Probleme vermindern könnten, wäre eine Kombination der beiden Steuerungsarten. Dabei würde man mit Hilfe der Phasenanschnittsteuerung das sanfte Hoch- und Runterfahren der Spannung regulieren. Zusätzlich wird mit der Schwingungspaketsteuerung die Anzahl Pakete mit dem Sanft-Anlasser eingeschaltet.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, ein solches Verfahren zu analysieren und mit einem geeigneten Messaufbau zu vergleichen. Dabei sollten zuerst die relevanten Informationen über die gängigen Steuerverfahren für ein- und dreiphasige Wechselspannungssteller eruiert werden. Anschliessend sollen analytisch die Strom-Harmonischen Oberschwingungen in Funktion zum Zündwinkel der Phasenanschnitt-Steuerung (ein- und dreiphasig) bestimmt werden. Auch die Strom-Harmonische in Funktion des Ein- und Ausschalt-Verhältnisses für Schwingungspaket-Steuerung sind ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit(problem von oben). Die Resultate der Steuerungsverfahren, die man mit den Simulations-Tools Plecs und Matlab aufgebaut hat, sollten mit einem Laboraufbau verglichen werden.(Methode nach dem Ziel) Danach betrachtet man ein Verfahren mit sanftem Hoch- und Runterfahren der Leistung und verifiziert das Ganze mess-technisch(Methode). Es muss ausserdem darauf geachtet werden, dass die gefundenen Verfahren zwingend die Netzvorschriften(Normen) einhalten.(Ziel) Schlussendlich wird mit einen UniPi-Steuergerät und einer kleinen Software die Steuerverfahren an einer ohmschen Last und einem Asynchronmotor betrieben.(Methode)

Die vorliegende Projektarbeit gliedert sich in XX Hauptkapitel. Im ersten Teil werden die wichtigsten Grundlagen erläutert. Sie dienen als Anfangskenntnisse der Arbeit und beschreiben die Funktionalität der einzelnen behandelten Verfahren, die aufzutretenen Probleme und die Gegenmassnahmen die man dabei treffen kann. Ausserdem werden die wichtigsten Normen die betrachtet wurden kurz zusammengefasst. Im nächsten Kapitel Simulation sind alle Resultate der simulierten Verfahren, welche man mit Plecs und Matlab dargestellt hat, aufgezeigt. Des weiteren verglich man die gegenseitigen Resultate der Simulationen und konnte sie so verifiziert. Das darauffolgende Kapitel 4 Umsetzung zeigen die Auswertungen des Laboraufbaus mit den verschiedenen angewandten Verbrauchern. Anschliessend Verifiziert man im Kapitel 5 die Resultate des Laboraufbaus mit denen der Plecs-Simulation und betrachtet ob man die angeschauten Normen eingehalten hat. Am Ende folgt in Kapitel 6 die Diskussion zu den verschiedenen Ansteuerungsverfahren und das endgültige Fazit. Des weiteren wird beschrieben inwiefern die gesetzten Ziele erreicht wurden. Bei der Wiederaufnahme des Projektes soll der Bericht eine verständliche Hilfe darstellen.

2 Grundlagen

Im diesem ersten Kapitel werden die Grundlagen, die für das Grundverständnis dieser Arbeit relevant sind, aufgelistet. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die beiden häufigsten Steuerverfahren für ohmsche Lasten, Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung, gerichtet. Beide Verfahren haben für den Endverbraucher oder das Netz, Vor- und Nachteile. Mit einer Kombination beider Steuerungsarten können zu einem späteren Zeitpunkt die Vorteile genutzt werden, um eine optimale Steuerung für den Verbraucher zu erhalten. Die Nachteile bei solchen Verfahren sind die verzerrten Signalen, die fast nicht zu vermeiden sind. Der folgenden Abschnitt enthält einige Informationen 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 zu achten ist, sind am Ende die drei wichtigsten zusammengefasst.

2.1 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. Durch Oberschwingungsspannung können zum Beispiel Spannungsverzerrungen vorkommen, die das Überhitzen von Drehfeldmotoren verursachen. Bei den Oberschwingungsströmen können zum Beispiel die Neutralleiter überlastet werden. Sie verursachen so einen erheblichen Schaden an einer Schaltanlage oder einer Hausinstallation.

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, da fast jedes elektrische Gerät verzerrte Signale zurück speist und so das Netz verunreinigt. 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 sind so konstruiert, dass sie weniger Oberwellen erzeugen. Auch bei den Verteilnetzen wird 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.

2.2 Oberschwingungen

Die Bedeutung Oberschwingung gehört dem Themenbereich «physische Eigenwertprobleme» also Wellen, deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundschwingungen sind. In der Musikwelt kommen Oberschwingungsfrequenzen vor allem bei Saiteninstrumenten vor, wie zum Beispiel bei einer Gitarre oder einer Geige.

Die meisten elektrischen Geräte halten nach der perfekten Welle Ausschau. Bei Wechselstrom definiert diese Perfektion eine perfekte Sinuskurve. Die daraus verwendete elektrische Spannung wechselt gleichmäßig zwischen der positiven und der negativen Halbwelle hin und her. Bei einer Frequenz von 50 Hz geschieht dies genau 50-mal pro Sekunde. Der Begriff Welle ist im 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 2.1 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 Formel 2.1 dargestellt.

$$f_h = n \cdot \text{Grundfrequenz} \quad (2.1)$$

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 2.1 und 2.2 zeigen eine Grundschwingung bei 50 Hz (blau) und die jeweilige 3. und 11. Ordnung der Grundfrequenz (gelb). Mit Hilfe der verschiedenen Ordnungen können beliebige Signal dargestellt werden. Im folgend Kapitel 2.3 behandelt man dies, mit einem verzerrten Signal.

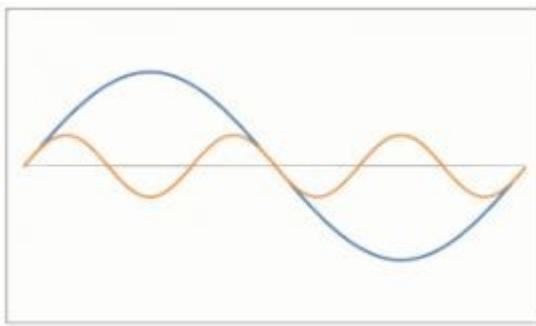


Abbildung 2.1: Grundschwingung mit 3. Ordnung [1]

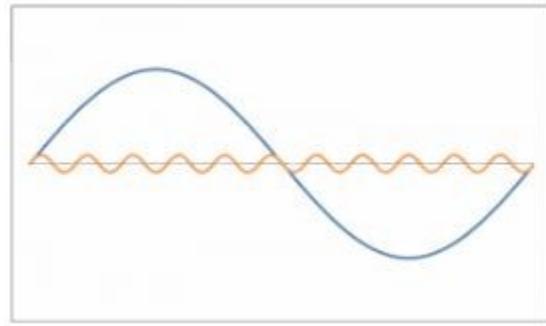


Abbildung 2.2: Grundschwingung mit 11. Ordnung [1]

2.3 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 mehreren harmonischen Oberschwingungen zerlegen. In der untenstehenden Abbildung 2.3 ist diese ersichtlich, wobei die rote Kurve das verzerrte Signal darstellt. Die drei blauen Sinusschwingungen bilden 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.

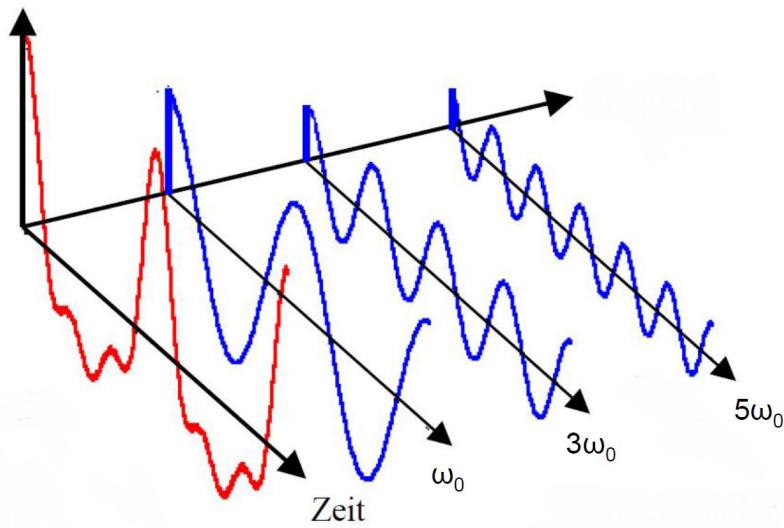


Abbildung 2.3: Addition der verschiedenen Oberwellen [2]

Anhand der Fourier-Transformation lassen sich die Amplitudenspektren mit den 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:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(nx) + b_n \cdot \sin(nx)] \quad (2.2)$$

Mathematisch wurden die Fourier-Koeffizienten a_0 , a_n und b_n mit den untenstehenden Formeln berechnet:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(n \cdot w_0 \cdot x) dx \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(n \cdot w_0 \cdot x) dx \quad (2.5)$$

Mit den oben genannten Fourier-Koeffizienten lassen sich nun das Amplituden- und Phasenspektrum von verschiedenen Signalen berechnen. Die verschiedenen Harmonischen Schwingungen aber auch die Sub- und Zwischenharmonischen können so ersichtlich in einem Frequenzspektrum dargestellt werden. Mit der folgenden Formel berechnet man das Amplituden und Phasenspektrum:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.6)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.7)$$

2.4 Vorkommen der Oberschwingungen

Oberschwingungsströme oder Verzerrte Signale lassen sich bei elektrischen Geräten fast nicht vermeiden. Ein wichtiger Bezugspunkt zu den Oberschwingungsgrößen ist dabei die gesamte harmonische Verzerrung. Man nennt ihn auch den THD-Wert (Total Harmonic Distortion). Diesen Wert gilt es besonders zu verstehen, damit man bestimmen kann ob ein Verbraucher an das Netz angeschlossen werden darf oder nicht. Man analysiert diesen Wert rechnerisch. Der THD-Wert 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 2.25, und die Verzerrung der Spannung als $THDu$, ersichtlich in der Formel 2.10, 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. Die Ordnungen wurde von der Norm so definiert. Man erkennt dies in der Formel 2.8. Mit diesem Wert lassen sich die erforderlichen Eigenschaften zur Auswahl eines effizienten aktiven Oberschwingungsfilters bestimmen.

$$THC = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} \quad (2.8)$$

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($THDi$) in Prozent berechnet wird.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

Parallel dazu zeigt die Formel die Totale Verzerrung der Spannung in Prozent:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

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).

2.5 Auswirkung von Oberschwingungen

Falls Oberschwingungen oder andere Netznachwirkungen bei Betriebsmitteln auftreten, können die Funktionen von den Geräten beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. Ein Beispiel dafür

ist, 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 bei einem dreiphasigen-Wechselstromsystem fliesst der ganze Rückleitstrom über den Sternpunkt des Transformators zurück. Gibt es viele Schaltnetzteile in einem System, heben sich die Rückleiterströme nicht mehr auf, sondern sie addieren sich. Die Folgen davon wäre eine Sternpunktverschiebung. Oberschwingungen können bei Glühbirnen die Glühfadentemperatur 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 Wirkungsweise des Schutzgerätes beeinflussen. Sind die Abstände zwischen Freileitungen und Telefonleitungen zu gering, können die Oberschwingungen die Sprachübertragung stören.

2.6 Zwischen- und Subharmonische Schwingungen

Die Subharmonischen sind sinusförmige Schwingungen, deren Frequenz unterhalb der Grundfrequenz entstehen. Ein Beispiel dafür sind 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 erkennbar in Abbildung 2.4 Die zwischenharmonischen Frequenzen und der damit verbundene 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.

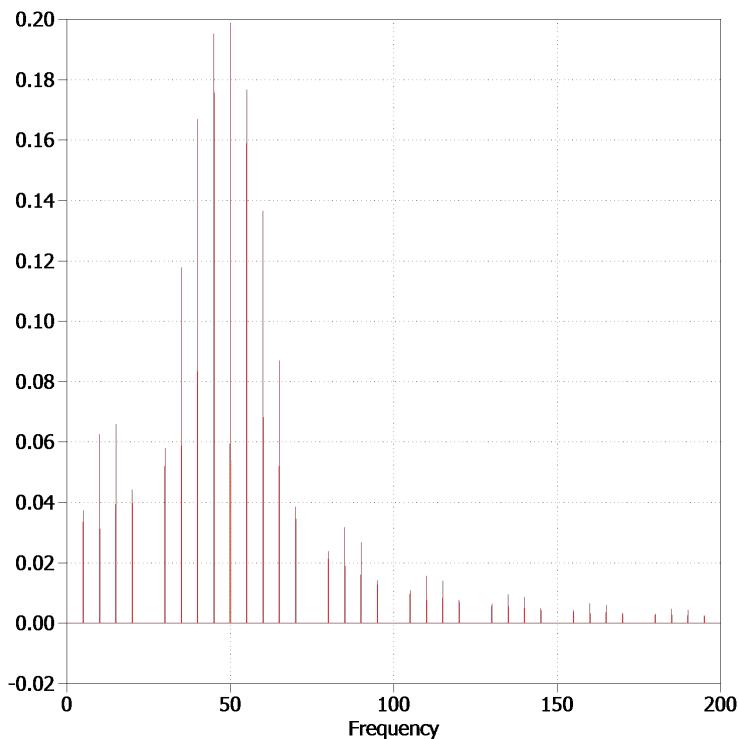


Abbildung 2.4: Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz

2.7 Phasenanschnittsteuerung

Bei der Phasenanschnittsteuerung wird das Sinussignal über einen TRIAC geführt. Ein TRIAC besteht aus zwei antiparallel geführte Thyristoren. Die Thyristoren zünden ab einem eingestellten Zündwinkel nach jedem Nulldurchgang. Je später der TRIAC eingeschaltet wird, desto kleiner wird die mittlere Leistung über der Last. Der Zündwinkel kann von 0° bis 180° eingestellt werden, wobei bei 0° die maximale Leistung und bei 180° keine Leistung über der Last anliegt. Das Problem bei der Phasenanschnittsteuerung ist, dass diese Schaltung Harmonische Oberschwingungen 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 Elektrizitätswerken nur bei kleinen Leistungen bis zu 200 Watt, bei symmetrischen Anschnittsteuerung von Wärmegeräten toleriert. Bei grösseren Leistungen wird deshalb die Schwungspaketsteuerung verwendet. Auf der Abbildung 2.5 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° eingestellt. Die Netzspannung wird somit nach 7.5 ms eingeschaltet und nach dem Nulldurchgang wieder gelöscht. Dies wiederholt sich bei jeder Halbwelle. Man erkennt anhand der Fläche unter den Kurven, dass die Leistung der zwei Phasenanschnittswinkeln von 135° und 45° kleiner ist als die der Netzspannung.

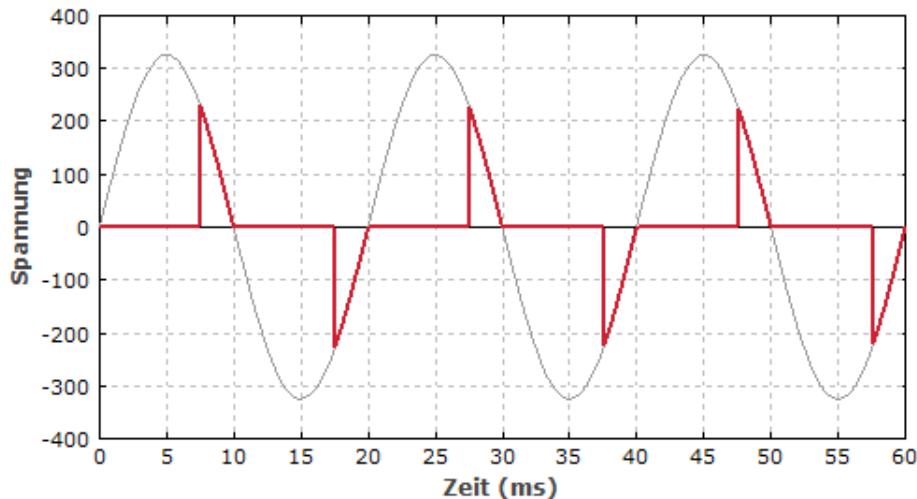


Abbildung 2.5: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [3]

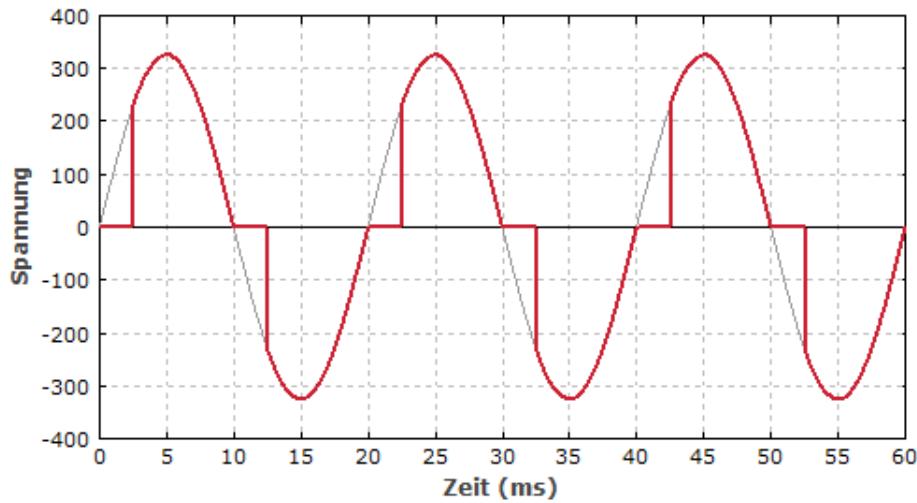


Abbildung 2.6: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45° [3]

In der Abbildung 2.6 ist ersichtlich, dass die Phase früher gezündet wurde. Somit erhält man eine an der Last eine grössere Leistung.

2.8 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.

Der Vorteil ist dabei, dass nahezu keine Verschiebungs-Blindleistung in der Grundschwingung auftreten. Die Verluste von elektrischen Geräten können so minimiert werden.

Wichtig sind dabei die Paketdauer T_0 und die Einschaltzeit T_E , wobei Letztere 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 treten aber Sub- und Zwischenharmonische auf. Auf der Abbildung 2.7 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.

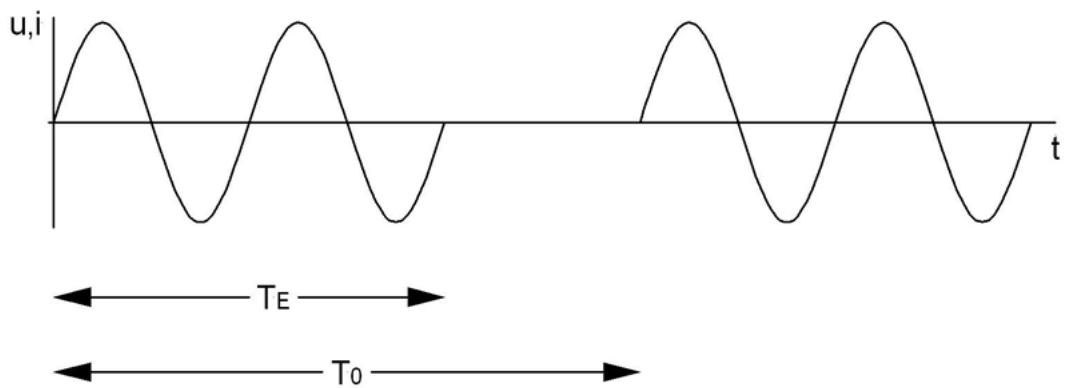


Abbildung 2.7: Schwingungspaketsteuerung $2/3$ der Leistung [4]

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

$$a = \frac{T_E}{T_0} \quad (2.11)$$

2.9 Leistungsfaktor

Der Leistungsfaktor wird meistens in der Leistungselektronik dafür verwendet, um das Verhältnis des Betrages der Wirkleistung P zur Scheinleistung S anzeigen zu können. Der Wert kann dabei zwischen 0 und 1 variieren. Wobei man sagen kann, dass je geringer der Wert ist, desto ineffizienter wird die Energie des Netzbetreibers genutzt. Um den Vergleich der beiden Ansteuerungsverfahren zu bekommen, bestimmte man daher den Leistungsfaktor beider verfahren. Bei der Phasenanschnittsteuerung geht der Leistungsfaktor bei einem kleinen Zündwinkel gegen 1, da das Verhältnis der umgesetzten Leistung als Funktion des Zündwinkels P_α , zur maximalen Leistung P_0 auch 1 ist. Je grösser der Zündwinkel gewählt wird, desto kleiner wird P_α und dementsprechend auch der Leistungsfaktor. Bei der Schwingungspaketsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig von dem Verhältnis der Einschaltzeit der Pakete zur Netzperioden. Je grösser die Einschaltzeit ist, desto grösser ist der Leistungsfaktor. Die genauere Herleitung der Faktoren 2.20 und 2.24 ist in dem folgenden Abschnitt beschrieben. In der Abbildung 2.8 ist ersichtlich, wie sich der Leistungsfaktor bei den beiden Steuerungsarten verhält.

[5].

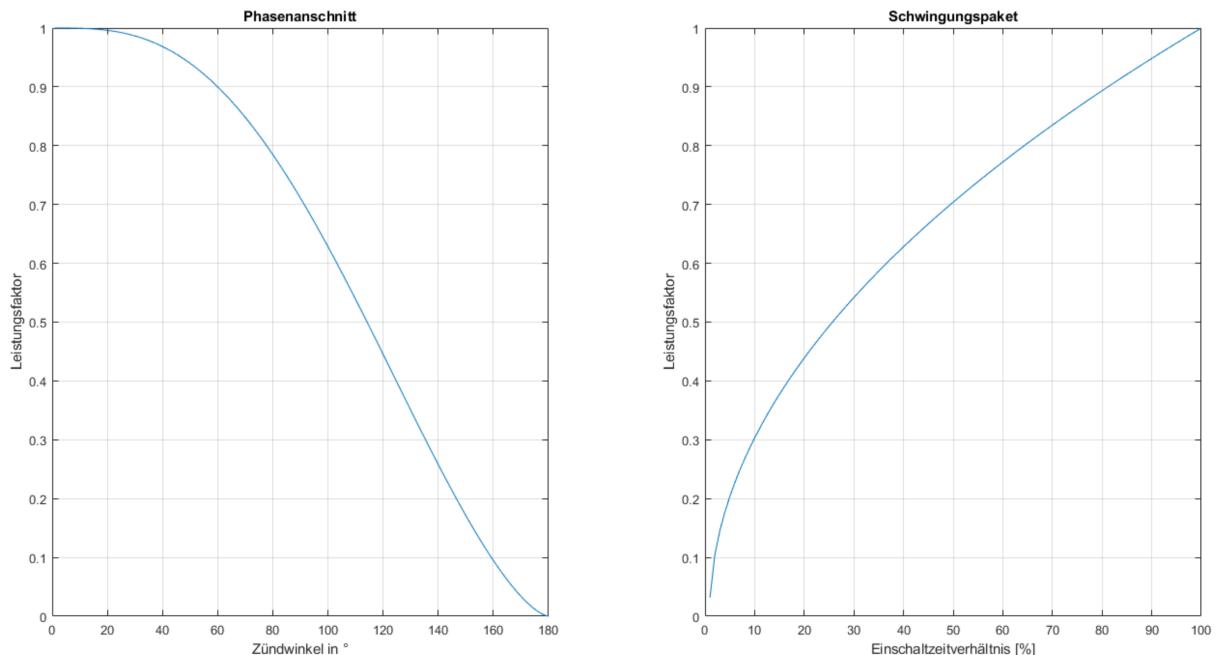


Abbildung 2.8: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung

Der Vergleich zeigt, dass für beide Verfahren bei gleicher Reduzierung der gebrauchten Leistung gegenüber der maximalen möglichen auch die gleichen Leistungsfaktoren ergeben. Bei der Schwingungspaketsteuerung wird die verzerrte Leistung hauptsächlich durch die Subharmonischen Schwingungen verursacht, wobei bei der Anschnittsteuerung die Harmonischen die Ursachen für die Verzerrleistung sind. Dies bedeutet, dass beide Verfahren eine gewissen Einfluss auf die Stabilität des Stromnetzes, die sogenannte Netzrückwirkung haben.

2.9.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung

Der Leistungsfaktor ist definiert als Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung.

$$\lambda = \frac{P_\alpha}{S} \quad (2.12)$$

Ist die der Lastkreis nur ohmsch belastet, so kann der Leistungsfaktor wie folgt beschrieben werden:

$$\lambda = \sqrt{\frac{P_\alpha}{P_0}} \quad (2.13)$$

Die Schein- und Wirkleistung im Lastkreis lassen sich mit den folgenden Formeln definieren:

$$S = I_L \cdot U_{UN} \quad (2.14)$$

$$P_\alpha = I_L^2 \cdot R_L \quad (2.15)$$

Der Laststrom wird mit folgender Formel beschrieben:

$$I_L = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \cdot \frac{U_{UN}}{R_L} \quad (2.16)$$

Wenn der Zündwinkel $\alpha = 0$ beträgt, wird im Lastwiderstand R_L die maximale Leistung P_0 in Wärme umgesetzt:

$$P_0 = \frac{U_{UN}^2}{R_L} \quad (2.17)$$

Mit den beiden Gleichung 2.16 und 2.15 lässt sich folgende Formel herleiten:

$$P_\alpha = \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)\right) \cdot \frac{U_{UN}^2}{R_L} \quad (2.18)$$

Die auf den Maximalwert bezogene Leistung folgt somit der Gleichung:

$$\frac{P_\alpha}{P_0} = 1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha) \quad (2.19)$$

Setzt man die Gleichung 2.19 in den Formel des Leistungsfaktors 2.13 so erhält man folgende Formel:

$$\lambda = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin(2\alpha)} \quad (2.20)$$

Man erkennt, dass der Leistungsfaktor bei rein ohmscher Belastung nur vom Einschaltwinkel abhängig ist. Die Eingangsspannung, der Laststrom oder der Lastwiderstand haben somit keinen Einfluss auf den Faktor.

2.9.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung

Das Einschaltverhältnis wird als a definiert und mit der Formel 2.11 beschrieben. Die Schein- und Wirkleistung haben den folgenden Bezug zum Einschaltverhältnis:

$$S_a = \sqrt{a} \cdot P \quad (2.21)$$

$$P_a = a \cdot P \quad (2.22)$$

Wenn die beiden Formeln 2.21 und 2.22 für die Wirk- und Scheinleistung in die Gleichung für den Leistungsfaktor eingesetzt werden, ergibt sich daraus folgende Gleichung:

$$\lambda = \frac{P_a}{S_a} = \frac{a \cdot P}{\sqrt{a} \cdot P} \quad (2.23)$$

Die Wirkleistung lässt sich weglassen und so ergibt sich folgende Formel für den Leistungsfaktor:

$$\lambda = \sqrt{a} \quad (2.24)$$

Mit den Formeln 2.20 und 2.24 kann nun der Leistungsfaktor des jeweiligen Steuerungsverfahren bestimmt werden.

2.10 Anforderung an die Netzqualität

Um die Anforderungen der Netzqualität zu gewährleisten, müssen die Normen eingehalten werden. Auf welche relevanten Nomen bei dieser Arbeit genau geachtet wurde, wird zu einem späteren Zeitpunkt erläutert. Zweck der Normen ist es, die verschiedene Merkmale wie zum Beispiel die Frequenz, die Amplitudenhöhe, die Kurvenform des Signals 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.

2.11 Gegenmassnahmen bei Oberschwingungen

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.

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.

2.11.1 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.

2.11.2 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.

2.11.3 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.

2.11.4 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.

2.11.5 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.

2.12 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, dokumentierte man sorgfältig zum Beispiel in den EN-Normen. Sie sollen einen optionalen Vorteil für die Gesellschaft und eine bestimmte Qualität erhalten.

Im folgenden Unterkapitel gibt es eine kurze Zusammenfassung der Normen, die für diese Arbeit als wichtig empfunden wurde. Es handelt sich dabei vor allem um die Spannungsqualität, welche man aus verschiedenem Blickwinkel angesehen hat. Die Normen EN 61000-3-2 und EN 61000-3-3 (Grenzwerte für Oberschwingungsströme, Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker im öffentlichen Netz) beschreiben, welche Spannungsänderung ein Elektrogerät haben darf, damit die ins öffentliche 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 Umgebungsbedingungen für niederfrequente, leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in die öffentlichen Versorgungsnetze.

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 gilt für elektrische und elektronische Geräte (Betriebsmittel und Einrichtungen) bis zu einem Eingangsstrom von 16 HZ je Leiter. Außerdem ist der Anschluss des Gerätes an das öffentliche Niederspannungs-Verteilnetz vorgesehen. Unter dem Begriff Elektrische Einrichtung versteht man eine Anlage, welche aus einem oder mehreren voneinander unabhängigen Geräten besteht. Sie bilden dann eine elektrische Einrichtung, wenn nur durch deren Zusammenwirken der bestimmungsgemäße Zweck der Einrichtung erzielt werden kann. Ein Beispiel wäre, bei einer elektrischen Einrichtung, der Treppenlichtautomat zusammen mit den dazugehörigen Leuchten. Nur der Automat ohne Beleuchtung erfüllt den technischen Zweck nicht. Ein weiteres Beispiel für eine Elektrische Einrichtung 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 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 nicht linearen Verbraucher am öffentlichen Versorgungsnetz zunehmend steigen, steigt auch der Anteil des Oberschwingungsgehalts der Versorgungsspannung. Schaltnetzteile, Audio-Verstärker, Beleuchtungseinrichtungen aber auch Waschmaschinen, Mikrowellenöfen oder 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 harmonischen Verlauf des Netzes. Um normgerechte und reproduzierbare Messungen der Stromoberschwingungen 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 Stromoberschwingung 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 $\pm 1.5^\circ$
- $U_{peak} = 1.4 \text{ V} - 1.42 \text{ V } U_{eff}$ und zwischen 87° und 93° 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

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. Außerdem beinhalten die folgenden Einrichtungen auch die Klasse A.

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

Um zu verdeutlichen, welche Geräte die anderen Klasse erhalten, sind sie Vollständigkeit halber auch noch aufgelistet.

Klasse B:

- tragbare Elektrowerkzeuge
- Lichtbogenschweissenrichtungen, die nicht zum professionellen Gebrauch vorgesehen sind.

Klasse C:

- Beleuchtungseinrichtungen

Klasse D:

- Personalcomputer und Bildschirme (Monitore) für Personalcomputer
- Fernseh-Rundfunkempfänger

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

Tabelle 2.2: Grenzwerte für Geräte der Klasse A

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:

Art des Geräteverhaltens	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 ^a
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

^a "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 2.3: Beobachtungsdauer für die Prüfung

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.

2.12.2 EN 61000-3-3

Auch diese Norm gilt 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 unterlegen. Die Flicker, die auch als repetitive Spannungsänderungen bekannt sind, die Spannungsschwankungen und die allgemeinen Spannungsänderungen, können so begrenzt werden. 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 6.47 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
- Lichtbogenschweiseinrichtungen
- Medizinische Geräte und Einrichtungen
- Mikrowellengeräte

Die Norm schreibt eine Prüfung, der zu beurteilenden Geräten, an einer Prüfungsimpedanz vor. Die Impedanz Z ist im unteren Bild als Widerstand R_A in Serie mit einer Spule jX_A dargestellt und entspricht den folgenden Werten:

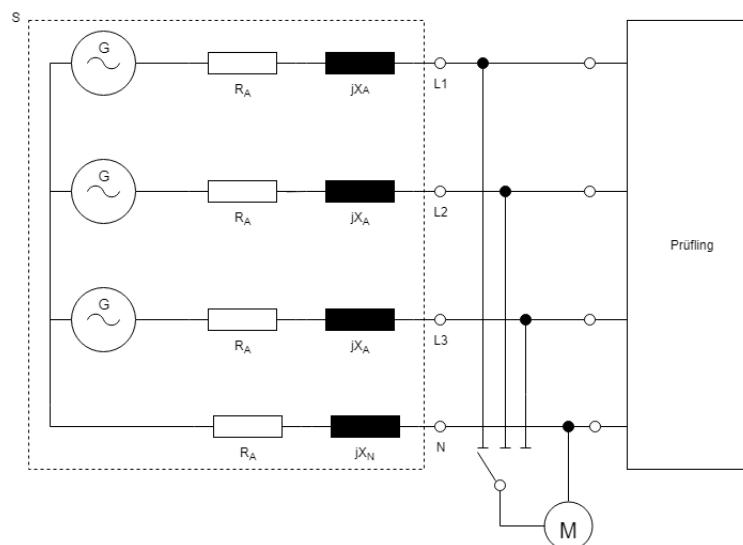


Abbildung 2.9: Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz

G Spannungsquelle

M Messeinrichtung

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

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

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

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).

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 60 W Glühbirne beleuchtet. Die Helligkeit variiert dabei auf Grund von Spannungsschwankungen. Erhält man den Wert 0 so bedeutet dies, dass praktisch keine Schwankungen der Spannungshöhe vorhanden und somit auch kein Flackern der Lampe ersichtlich ist.

Bei dem Wert 1 gibt es eine gewisse Helligkeitsschwankung, die als störend wahrgenommen wird. Jedoch sind die Resultate nicht aussagekräftig, da sie Orts-, Zeit- und Personen abhängig sind. Deshalb entwickelte man einen Algorithmus und ein entsprechendes Formelwerk für das Durchschnittsempfinden der Erkenntnisse. Mit Hilfe eines Flicker-Meter konnte ein geeignets Messgerät entwickelt werden, welches mit einem Flickermessverfahren den Flickerwert berechnen konnte. Das Flicker-Meter liefert alle 10 Minuten einen Wert, der mit Pst bezeichnet wird. Das P steht dabei für *perceptibilityunits* (Wahrnehmungseinheiten) und st steht für *shorttime*. 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 und ist in der unterstehenden Formel dargestellt.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st,i}^3}{N}} \quad (2.25)$$

Alle Spannungen werden auf die Nennspannung U_n normiert: relative Spannungsänderung:

$$d = \frac{\Delta U}{U_n} \quad (2.26)$$

relative Spannungsänderungsverlauf

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.27)$$

relative konstante Spannungsabweichung

$$d_c = \frac{\Delta U_c}{U_n} \quad (2.28)$$

grösste relative Spannungsänderung

$$d_{max} = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} \quad (2.29)$$

relative Spannungsschwankung

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (2.30)$$

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 von niederfrequenten, leitungsgeführten Störgrößen und für Signale von Netz-Kommunikationssystemen in öffentlichen Niederspannungs- und Stromversorgungsnetzen. Die Werte des Verträglichkeitspegels mit ihrer Eigenschaft können für die 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 50. Oberschwingungsordnung
- Zwischenharmonische
- Spannungsverzerrungen bei Frequenzen oberhalb der 50. Oberschwingungsordnung
- Spannungseinbrüche
- Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Spannungsunsymmetrien
- Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Transiente Überspannung
- Zweiteilige Schwankung der Netzfrequenz

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. 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.

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 2.4: Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz

Bei Kurzzeiteffekten wird ein Faktor k zu den harmonischen Ordnungen hinzu multipliziert. Dieser Faktor wird wie folgt berechnet:

$$k = 1.3 + \frac{0.7}{45} \cdot (h - 5) \quad (2.31)$$

Der entsprechende Kompatibilitätsgrad für die gesamte harmonische Verzerrung liegt daher bei THD = 11%.

Die unterstehende 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.

Ordnung [m]	50 Hz System	
	Subharmonische Frequenzen fm [Hz]	Um %
		230V
0.20 < m ≤ 0.60	10 < fm ≤ 30	0.51
0.60 < m ≤ 0.64	30 < fm ≤ 32	0.43
0.64 < m ≤ 0.68	32 < fm ≤ 34	0.35
0.68 < m ≤ 0.72	34 < fm ≤ 36	0.28
0.72 < m ≤ 0.76	36 < fm ≤ 38	0.23
0.76 < m ≤ 0.84	38 < fm ≤ 42	0.18
0.84 < m ≤ 0.88	42 < fm ≤ 44	0.18
0.88 < m ≤ 0.92	44 < fm ≤ 46	0.24
0.92 < m ≤ 0.96	46 < fm ≤ 48	0.36
0.96 < m ≤ 1.04	48 < fm ≤ 52	0.64
1.04 < m ≤ 1.08	52 < fm ≤ 54	0.36
1.08 < m ≤ 1.12	54 < fm ≤ 56	0.24
1.12 < m ≤ 1.16	56 < fm ≤ 58	0.18
1.16 < m ≤ 1.24	58 < fm ≤ 62	0.18
1.24 < m ≤ 1.28	62 < fm ≤ 64	0.23
1.28 < m ≤ 1.32	64 < fm ≤ 66	0.28
1.32 < m ≤ 1.36	66 < fm ≤ 68	0.35
1.36 < m ≤ 1.40	68 < fm ≤ 70	0.43
1.40 < m ≤ 1.80	70 < fm ≤ 90	0.51

Tabelle 2.5

Einige Effekte, die wegen subharmonische Oberschwingung entstehen können sind:

- Unerwünschter Strom, der in die Versorgungsnetze fliest, welcher zusätzlicher Energieverlust verursacht.
- Subharmonische Spannungen stören den Betrieb von Leuchtstofflampen und anderen elektronischen Geräten, 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 ändert.
- 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.

3 Simulationen

Das folgende Kapitel beschreibt alle Simulationen und deren Auswertungen, die mit den Simulation-Tools Matlab und Plecs durchgeführt wurden. Anhand der Resultate konnten die zwei Verfahren miteinander verglichen und auf ihre Richtigkeit geprüft werden. Mit den Simulationen konnten erste Einblicke in das Verhalten der beiden Steuerungsverfahren, Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung, gewonnen werden.

3.1 Simulation mit Matlab

Um die einphasigen Plecs-Simulationen der Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung zu verifizieren, errechnete man parallel zu den Plecs-Simulationen die gleichen Verfahren mit Matlab durch. Im folgenden Abschnitt ist aufgezeigt, wie die Ergebnisse der Matlabfunktionen zustande gekommen sind und welche Überlegungen vorgenommen wurde.

3.1.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Als Erstes simulierte man eine periodische Sinusfunktion im Zeitbereich mit verschiedenen Phasenanschnittswinkeln. Die Periodenlänge definierte man dabei auf 2π . Die Amplitude des Sinus beträgt ± 1 Volt. Der Winkel des Phasenanschnittes wurde mit verschiedenen, geläufigen Werten wie zum Beispiel 30°, 45°, 60°, 90° oder 120° betrachtet. In den folgenden Bildern 3.1 erkennt man die Sinusfunktionen mit einem Phasenanschnitt von 60° in Abbildung 3.1a und 90° in der Grafik 3.1b. Weitere Funktionen mit den anderen Anschnittswinkeln sind im Anhang ersichtlich.

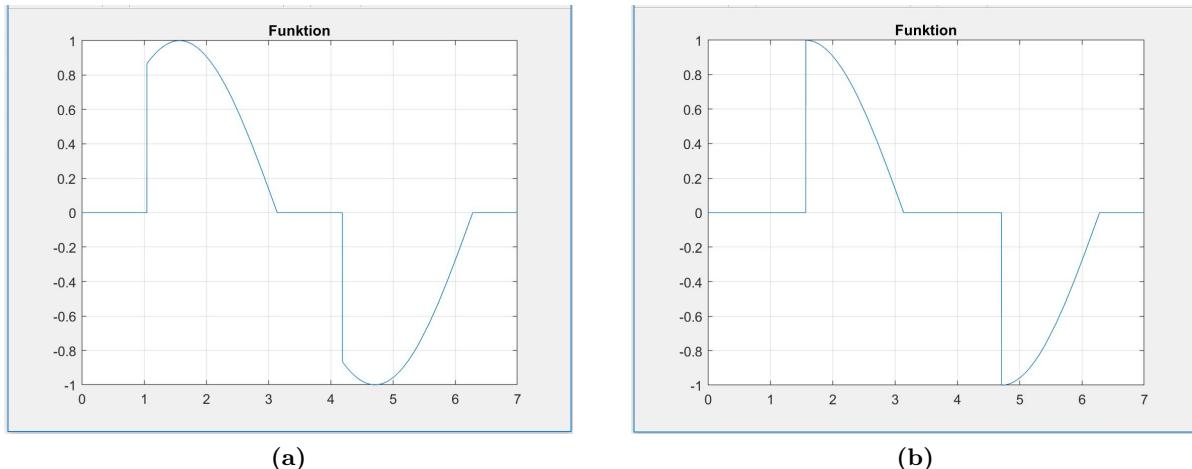


Abbildung 3.1: Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°

Nachdem man die Funktion konstruiert hat, wurden diese in die einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Man bezeichnet dies als Fourier-Analyse. Mit Hilfe der Fourier-Koeffizienten a_0 , a_n und b_n konnte das Amplituden- und Phasenspektrum berechnet werden. Die mathematische Formel der Koeffizienten, der Spektren und die Beschreibung der Fourier-Analyse ist im Kapitel 2.3 aufgezeigt.

Die Darstellung im Zeitbereich beziehungsweise im Frequenzbereich sind äquivalent, sie enthalten beide die vollständige Information über die Funktionen. Im folgenden Frequenzspektrum benutzt man die vertikalen Linien, um die Komponenten der einzelnen Frequenzen auf der x-Achse anzugeben. Die y-Achse zeigt die Länge der Amplituden, bei den verschiedenen Frequenzen, an. In den untenstehenden Grafiken 3.2 erkennt man das Amplituden- und Phasenspektrum des in Abbildung 3.1 dargestellten Signale mit den Winkeln von 60° und 90° .

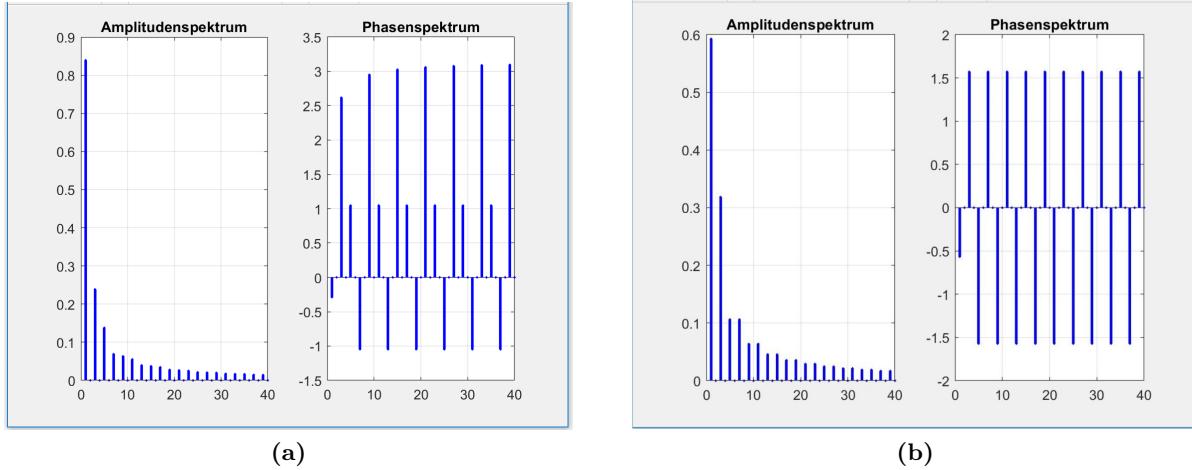


Abbildung 3.2: Amplituden- und Phasenspektrum (a) 60° (b) 90°

Zur Kontrolle der Berechnungen des Amplituden- und Phasenspektrum, wurde mit den zwei Spektren das Eingangssignal rekonstruierte. Die Signale sind auf der nächsten Abbildung 3.3 erkennbar. Es ist ersichtlich das die Rundung des Sinus nicht genau dem, des eigentlichen Signals entspreche 3.1. Dies kommt davon, dass man die Funktion in "nur" 40 Frequenzanteile unterteilt hat. Würde man eine höhere Anzahl Anteile verwenden, so könnte die Ungenauigkeiten deutlich verkleinert werden. Da man jedoch nur einen ungefähren Vergleich der beiden Funktionen haben möchte, reichen 40 Teile völlig aus.

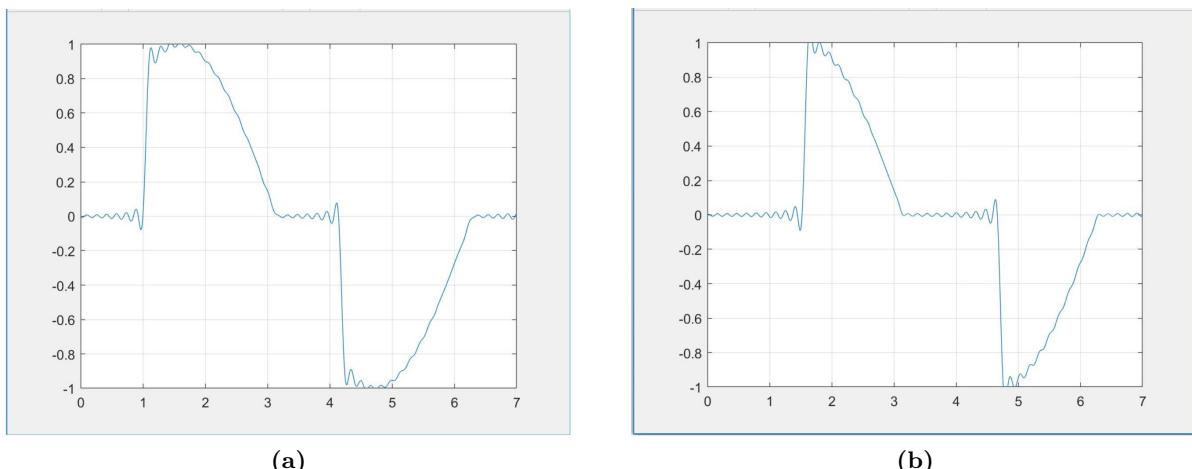


Abbildung 3.3: Rekonstruiertes Signal (a) 60° (b) 90°

Nach dem man das Phasenanschnittsignal, das Amplitudenspektrum, das Phasenspektrum und das rekonstruierende Eingangssignal von Hand berechnet und dargestellt hat, überprüfte man mit Hilfe der FFT-Funktion (Fast Fourier Transform) von Matlab die Werte der Grafiken. In den folgenden Abbildungen 3.4 und 3.5 erkennt man die Plots mit den beiden Winkel von 60° und

90°. Bei dem Amplitudens- 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 FFT zu vergleichen mit dem Wert 10 bei den von Hand berechneten Spektren. Als Resultat erkennt man das beide Methoden die gleichen Ergebnisse herausgegeben haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Überlegung der Berechnungen korrekt waren.

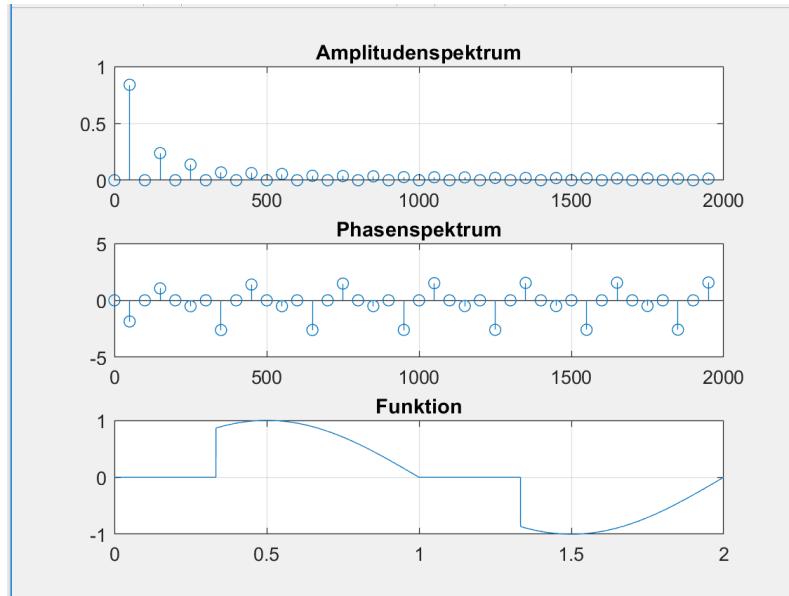


Abbildung 3.4: FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von 60°

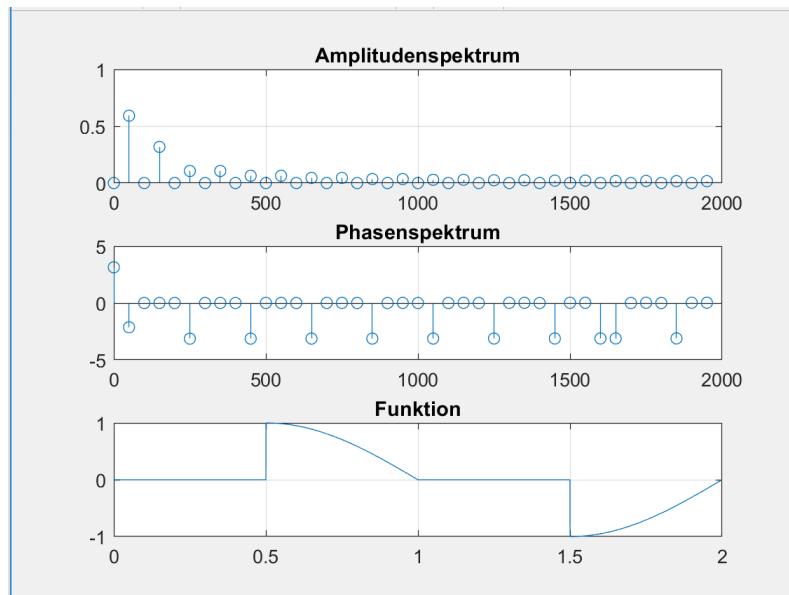


Abbildung 3.5: FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von 90°

3.1.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle von 0.5 und 0.8

Bei der zweiten Funktion, die zu überprüfen und simulieren war, handelte es sich um eine Schwingungspaketsteuerung. Die komplette Paketdauer beträgt bei den abgebildeten Funktionen 20 Halbwellen, ersichtlich in Abbildung 3.6. Man untersuchte nun verschiedene Einschaltverfahren mit verschiedenen duty cyclen, wie zum Beispiel 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 oder 0.8. In der Grafik 3.6 erkennt man im linken Bild 3.6a einen duty cycle von 0.5. Demzufolge sind immer 10 Halbwellen ausgeschaltet und die anderen 10 eingeschaltet. Auf der rechten Seite 3.6b beträgt der Wert des duty cycle 0.8. Es sind also zuerst 4 Halbwellen ausgeschaltet und die restlichen 16 Halbwellen werden angesteuert. Die anderen Funktionen mit den dazugehörigen duty cyclen sind im Anhang ersichtlich. Für einen sinnvollen Vergleich untersuchte man bei beiden Simulationsmethoden 5 komplette Schwingungspakete.

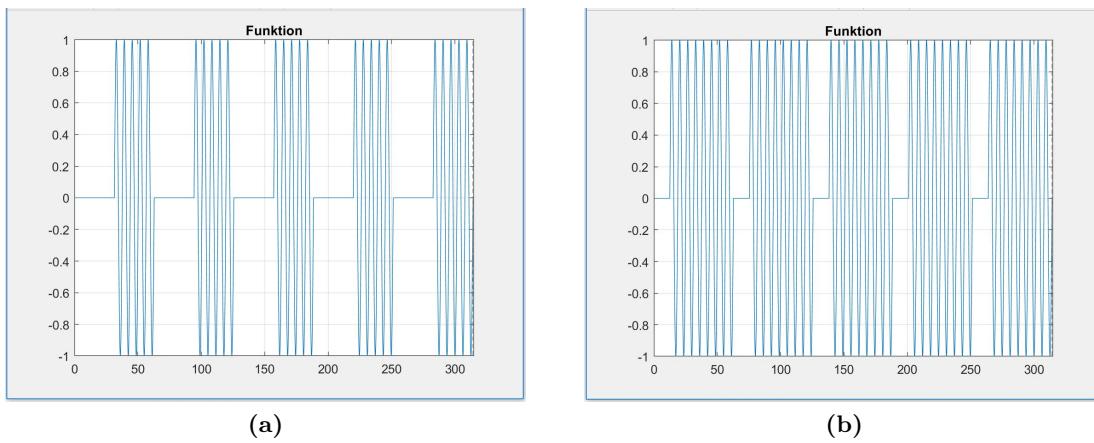


Abbildung 3.6: Schwingungspaket mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

Um auch hier die Plecs-Simulation zu überprüfen, stellte man das Amplitudenspektrum absolut linear dar. Bei der folgenden Abbildungen 3.7 erkennt man diese Spektren. 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.

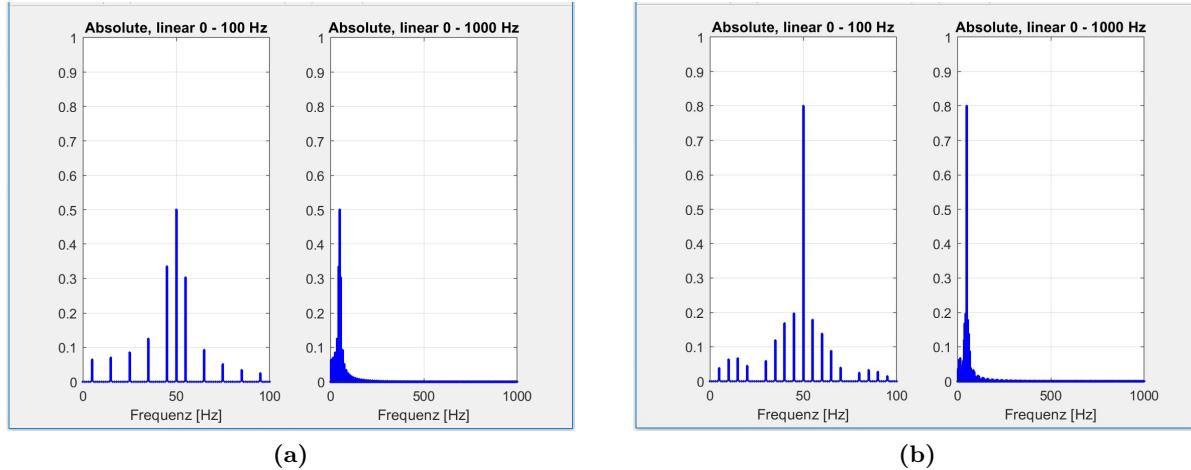


Abbildung 3.7: Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

Damit man alle relevanten Oberschwingungen erkennt, wurde das Spektrum bis auf 1000 Hz erweitert. Dies ist auf der rechten Seite des jeweiligen Bildes ersichtlich. Bei der linken Abbildung

3.7a wurde das Amplitudenspektrum mit einem duty cycle von 0.5 dargestellt und im rechten Bild 3.7b verwendete man einen duty cycle von 0.8. Vergleicht man die zwei Diagramme erkennt man, dass je grösser der duty cycle ist, desto höher ist der Peak-Wert bei der Grundfrequenz von 50 Hz. Dies kommt davon, dass bei einem grösseren duty cycle mehrere Sinusschwingungen vorkommen als bei einem niedrigen.

Die dritte Darstellungsfunktion, welche man untersuchte, war der absolute Logarithmus. Man erkennt die Darstellung in der Abbildung 3.8. Für die Berechnung der Dämpfung [dB], verwendete man das Verhältnis der Bezugsspannung U_0 bei 50 Hz mit der zu messenden Spannung U_n . Auch hier wurden die bereits bekannten duty cycle Werte von 0.5 in der linken Abbildung 3.8a und 0.8 in der rechten Grafik 3.8b verwendet, um den absoluten Logarithmus anzuseigen.

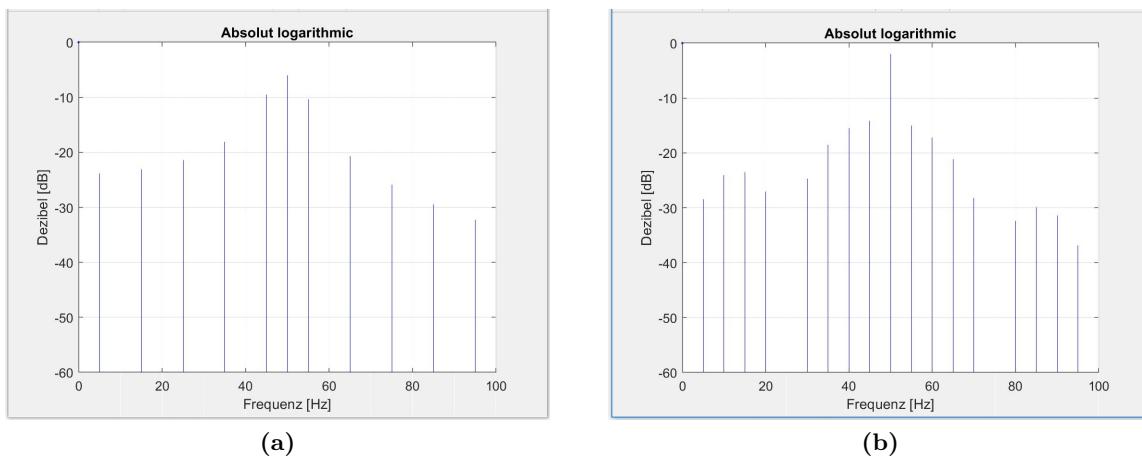


Abbildung 3.8: Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

3.2 Simulation mit Plecs

Mit dem Simulationsprogramm Plecs wurden alle gewünschten Ansteuerungen simuliert. Die einphasigen Simulationen der Phasenanschnitt- und der Schwingungspaketsteuerung konnten mit den Matlab-Funktionen verglichen und ausgewertet werden. Nachdem dies verifiziert wurde, 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 ersichtlich.

3.2.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Die erste untersuchte Plecs-Simulation war die Phasenanschnittsteuerung. 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 beim Matlab in der Abbildung 3.1. In der unteren Grafik, erkennt man ein Sinussignal mit einem Phasenanschnitt von 60° links 3.9a und einen mit 90° rechts 3.9b. Um die Spektren mit den Matlab-Simulationen vergleichen zu können, wurde die Amplitude des Sinussignales auch auf ± 1 Volt gestellt.

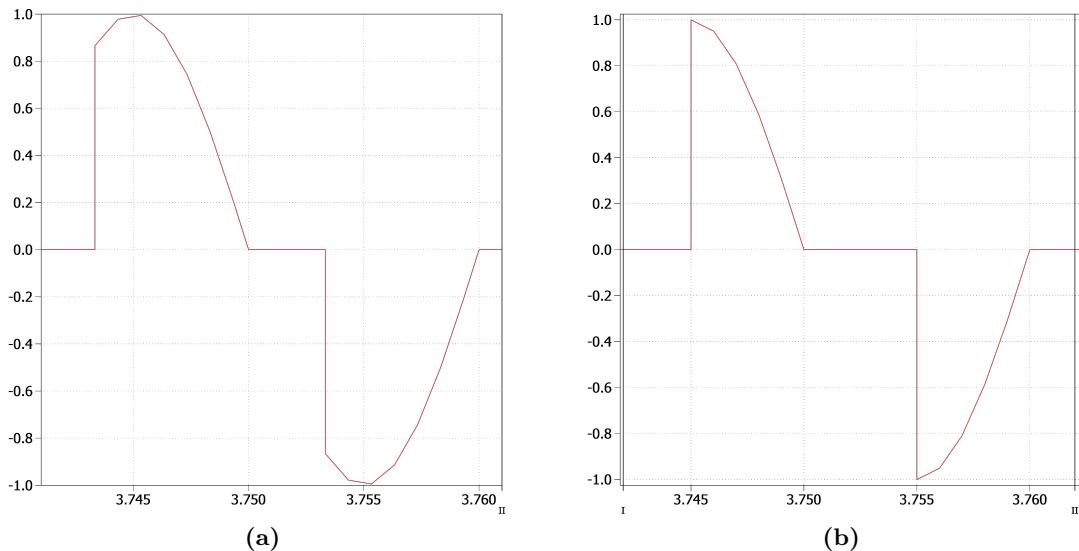


Abbildung 3.9: Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°

Die folgenden Bilder 3.10 zeigen das Amplitudenspektrum der Phasenanschnittsteuerung mit den zwei bereits verwendeten Winkeln. Die Grafik musst nicht wie bei der Matlab-Funktion von Hand berechnet werden, 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 analysiert.

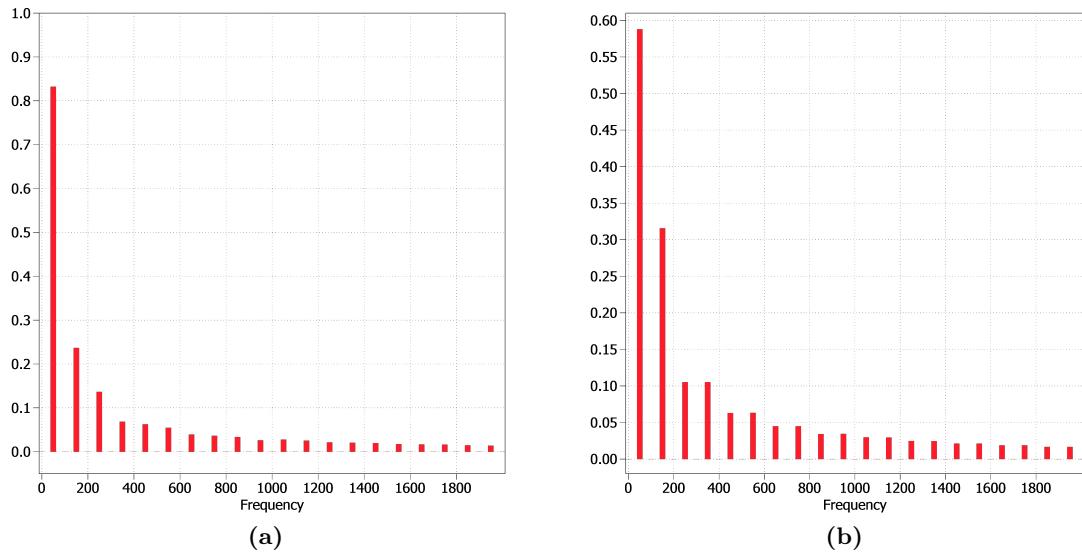


Abbildung 3.10: Amplitudenspektrum (a) 60° (b) 90°

3.2.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle von 0.5 und 0.8

Als nächstes wurde eine Simulation für die Schwingungspaketsteuerung aufgebaut 3.11. Auch hier verwendete man einen duty cycle von 0.5 in Bild 3.11a beziehungsweise 0.8 in der Darstellung 3.11b, damit man die Resultate wieder mit der Matlab-Funktion vergleichen kann.

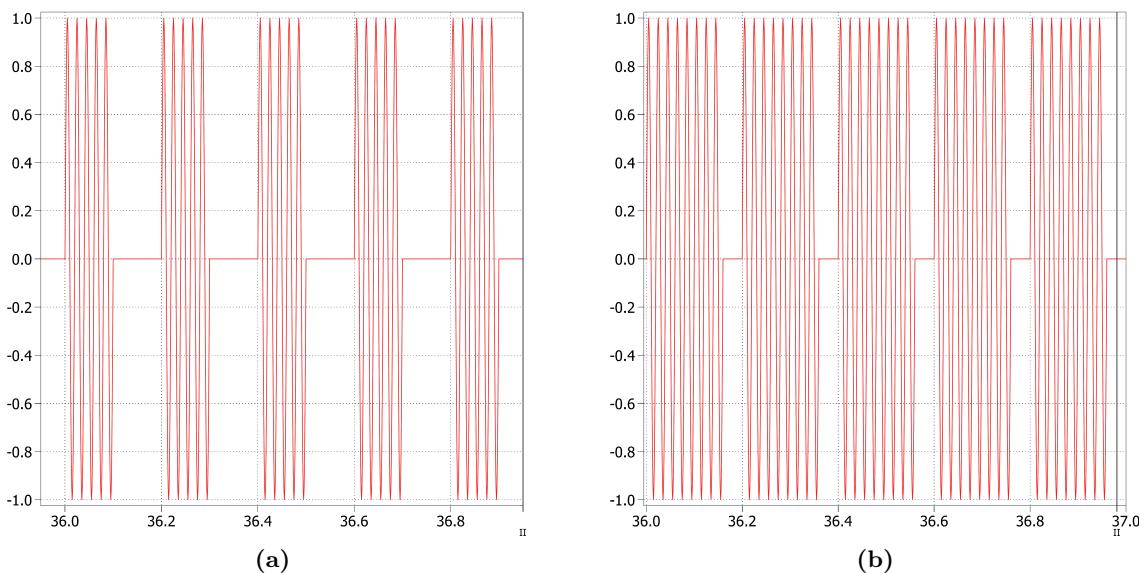


Abbildung 3.11: Schwingungspaket mit einem duty cycle (a) 0.5 (b) 0.8

In der folgende Abbildung 3.12 wurde das Amplitudenspektrum des Schwingungspaketes mit einem duty cycle von 0.5 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung 3.12a erkennt man das bekannte Spektrum von 0- 100 Hz mit den Subharmonischen Werten unterhalb von 50 Hz und den Zwischenharmonischen Schwingungen von 50 Hz -100 Hz. In der rechten Grafik 3.12b erweiterte man das Spektrum bis zu 1000 Hz. Auch hier ist eine optische Ähnlichkeit zur Matlab-Funktion ersichtlich.

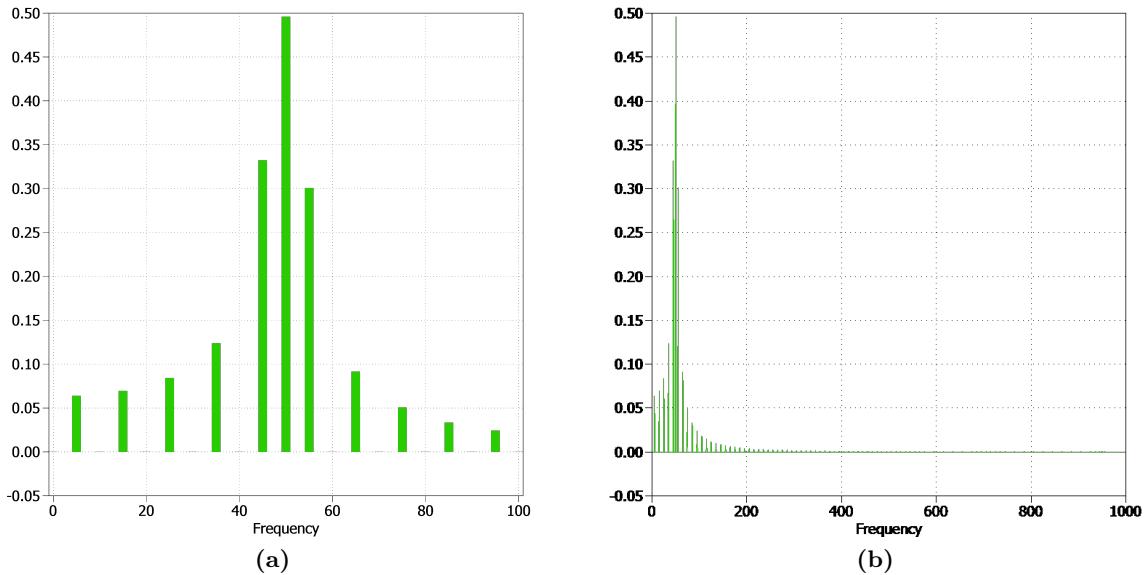


Abbildung 3.12: Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz

Vollständigkeits halber realisierte man das gleiche noch mit einem duty cycle von 0.8. Auch hier ist das Spektrum, in der linken Abbildung 3.13a mit einer Frequenz von 0 Hz - 100 Hz und im rechten Bild 3.13b bis 1000 Hz, dargestellt.

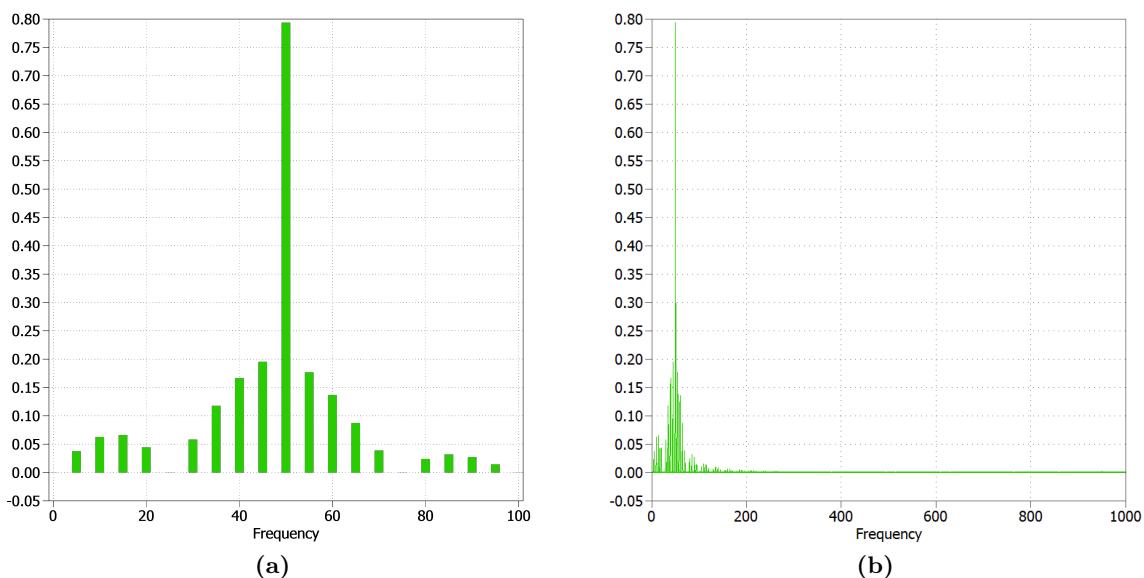


Abbildung 3.13: Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.8 von (a) 0 Hz - 100 Hz (b) 0 Hz - 1000 Hz

Letztlich wurde noch das lineare absolute Spektrum der beiden duty cyclen, 0.5 in Bild 3.14a und 0.8 in Abbildung 3.14b, veranschaulicht. Damit man die Grafiken mit der Matlab-Simulation vergleichen konnte, entschied man sich das Spektrum bis zu einer Frequenz von 100 Hz anzuzeigen. Auch hier erkennt man eine optische Ähnlichkeit zur Matlab-Simulation.

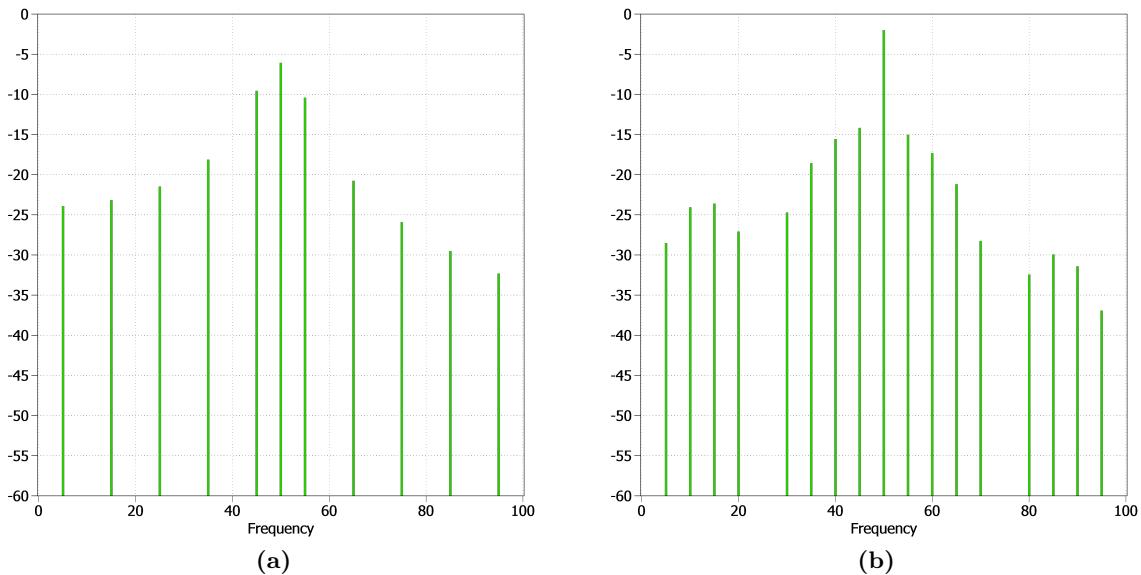


Abbildung 3.14: Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

3.2.3 Vergleich der einphasigen Resultate mit Plecs und Matlab

Optisch betrachtet, sehen die Resultate der beiden einphasigen Simulationen sehr ähnlich aus. Um jedoch eine konkrete Bestätigung der Analyse zu erhalten, wurden alle Werte der einphasigen Simulationen nummerisch miteinander verglichen. Man erkannte, dass die meisten gegenübergestellten Werte eine Abweichung von unter 1 % haben. Dies wurde als sehr niedrig empfunden. Somit konnten die beiden Simulationen auch nummerisch auf ihre Richtigkeit geprüft werden. In der Abbildung 3.15 ist der Vergleich des Amplitudenspektrum mit einem Phasenanschnittswinkel von 90° ersichtlich. Die anderen Aufnahmen sind optisch und nummerisch im Anhang dargestellt.

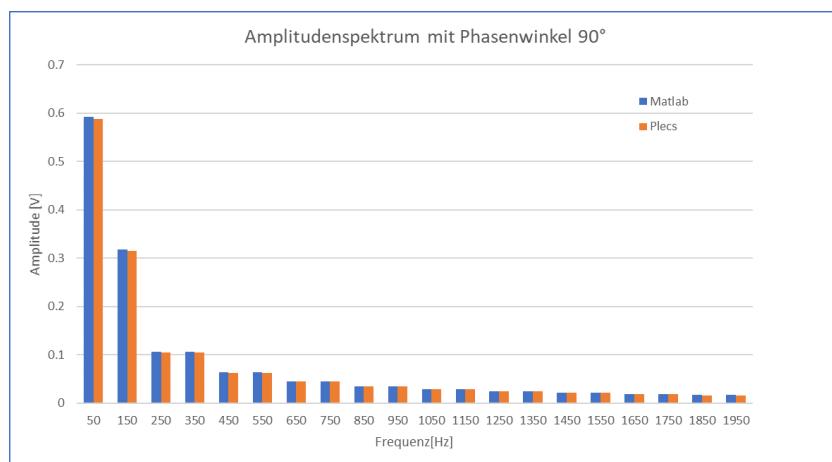


Abbildung 3.15: Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel 90°

3.2.4 Dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Bei den folgenden Abbildungen 3.16 und 3.17 handelt es sich um die Simulation der dreiphasigen Phasenanschnittsteuerung, mit den bekannten Winkel von 60° und 90°. In den linken Bildern 3.16a und 3.17a ist im unteren Bereich, dass Eingangssignal mit der verketteten Nennspannung von 230 Volt dargestellt. Die oberen Grafiken zeigen die Spannungen, welche über den Widerständen abfallen, nachdem der jeweilige Triac, mit dem eingestellten Winkel, gezündet hat. Die Werte der Widerstände stellte man auf 150Ω ein, da der Culatti im Messaufbau den gleichen Wert hat.

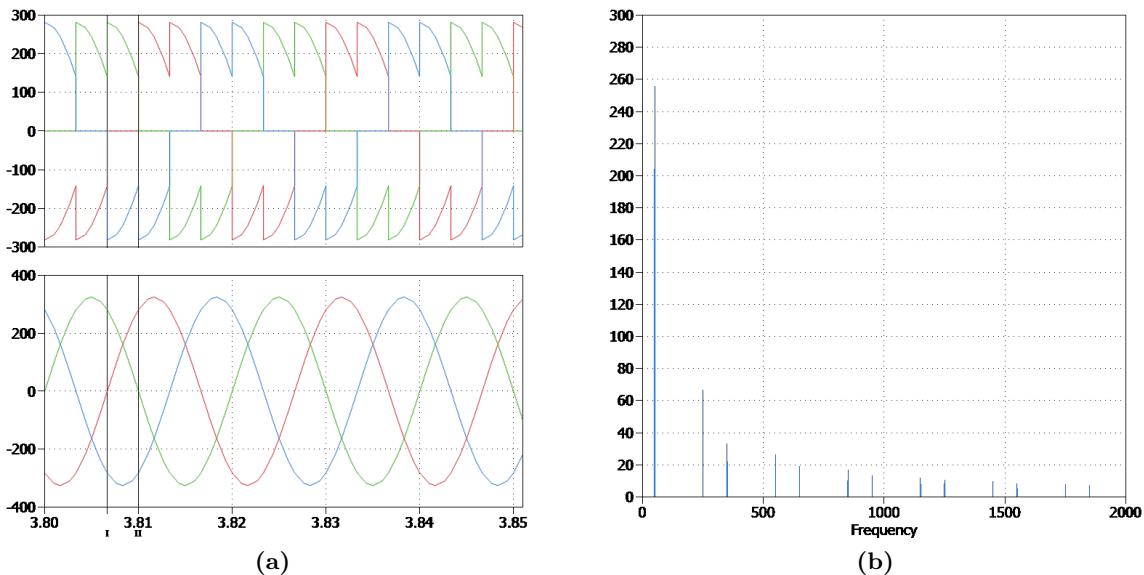


Abbildung 3.16: dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60°(a) Signal (b) FFT

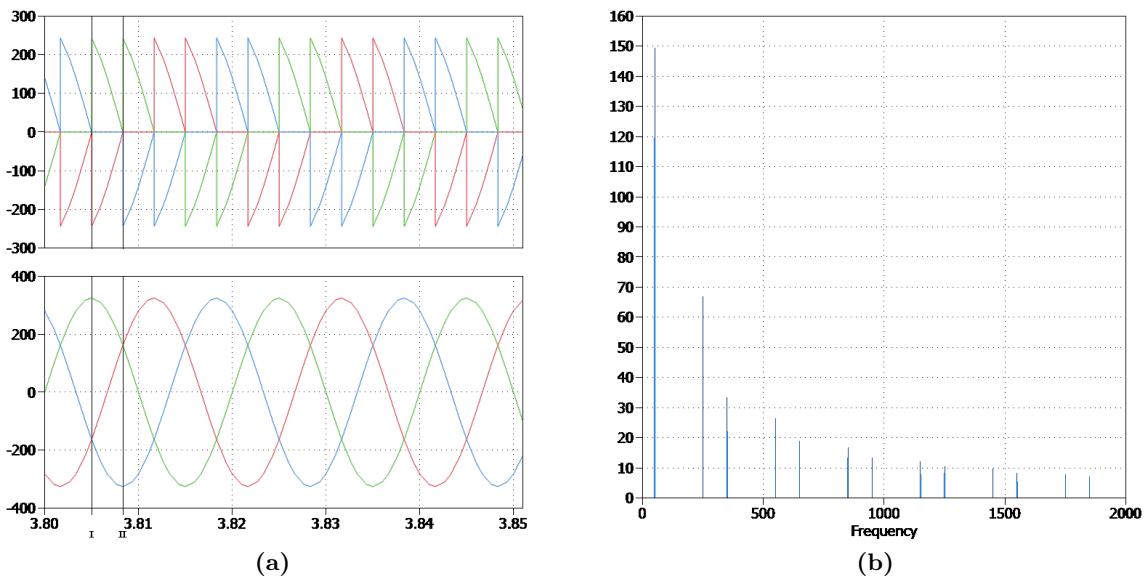


Abbildung 3.17: dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 90°(a) Signal (b) FFT

Anhand von Cursor 1 erkennt man, dass zuerst eine positive Halbwelle der Eingangsspannung, des ersten Außenleiter (grün), anliegt. Der positive Thyristor des ersten Triacs zündet somit bei

90° beziehungsweise bei 60°. Da der Sternpunkt bei dieser Schaltung nicht mit dem Neutralleiter verbunden wurde, tritt eine negative Spannung über dem Thyristor des zweiten Triac auf (rot). Beim Cursor 2 hat es eine negative Eingangsspannung des zweiten Außenleiters (blau). Somit zündet der negative Thyristor des dritten Triacs und die entgegengesetzte positive Spannung entsteht über dem ersten Thyristor (grün) des ersten Triacs. Diese Abfolge wird beliebig weiter geführt. Da es sich nur um eine Ohmsche Last handelt, verhält sich das Stromsignal phasengleich wie die Spannungskurve.

Auf der Abbildung 3.16b und 3.17b erkennt man die beiden FFTs der jeweiligen Phasenanschnittsteuerungen. Es ist ersichtlich, dass auch bei dreiphasigen Phasenanschnittsteuerungen nur Harmonische Oberschwingungen vorkommen und keine Sub- oder Zwischenharmonische.

3.2.5 Dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cyclen von 0.5 und 0.8

Nachfolgend sind die dreiphasigen Schwingungspaketsteuerungen mit den duty cycle von 0.5 in Abbildung 3.18a und 0.8 in Abbildung 3.19b dargestellt. Die drei Eingangsspannungen und die Widerstände richtete man gleich, wie bei der dreiphasigen Phasenanschnittsteuerung, ein. Daher sind auch die Strom- und Spannungsverläufe wieder phasengleich. Bei den grünen, roten und blauen Kennlinien, handelt es sich um die Spannungspakete über den einzelnen Widerständen. In den Bildern 3.18b und ?? sind die FFTs der Schwingungspaketsteuerung ersichtlich. Man erkennt vor allem, dass es vor und nach 50 Hz (hoher Peak) viele Sub- und Zwischenharmonische Oberschwingungen hat. Eine gewisse Ähnlichkeit mit den einphasigen Paketsteuerungen ist ersichtlich.

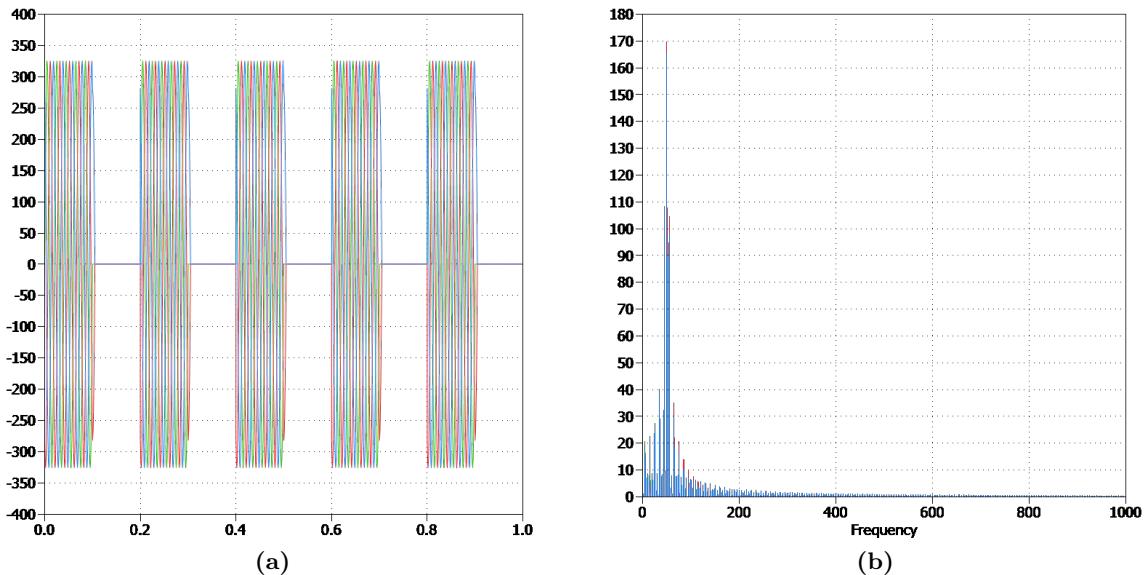


Abbildung 3.18: dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.5 (a) Signal (b) FFT

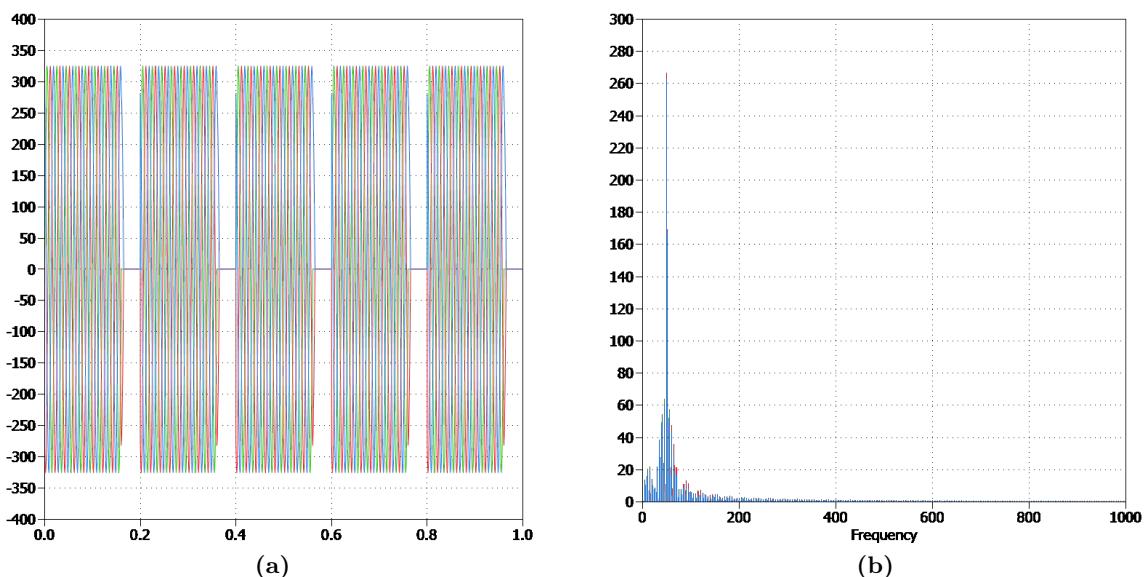


Abbildung 3.19: dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.8 (a) Signal (b) FFT

3.2.6 Einphasige Kombination des Sanft-Anlassen

Nach dem man die beiden Steuerungsverfahren im ein- und dreiphasigen System simuliert hat, wurde eine Kombination der beiden Verfahren entwickelt. In der Abbildung 3.20b erkennt man ein sanftes Anlassen der Spannung bis auf die volle Leistung und nach einiger Zeit wieder ein sanftes herunterfahren der Spannung bis die Leistung null beträgt. Im Bild 3.20a ist der duty cycle auf 0.5 eingestellt. Die einzelnen Pakete verhalten sich nun so wie das sanfte Anlassen und Runterfahren der in Abbildung 3.20b gezeigten Spannung. Vergleicht man das FFT in der Grafik 3.21a mit dem FFT des Schwingungspaketes mit hartem zu- und Wegschalten 3.12b ist eine Verringerung der Subharmonischen Schwingungen ersichtlich. Der Sanft-Anlass hat aber zufolge, dass es bei den Harmonischen einige Oberwellen hinzugekommen sind.

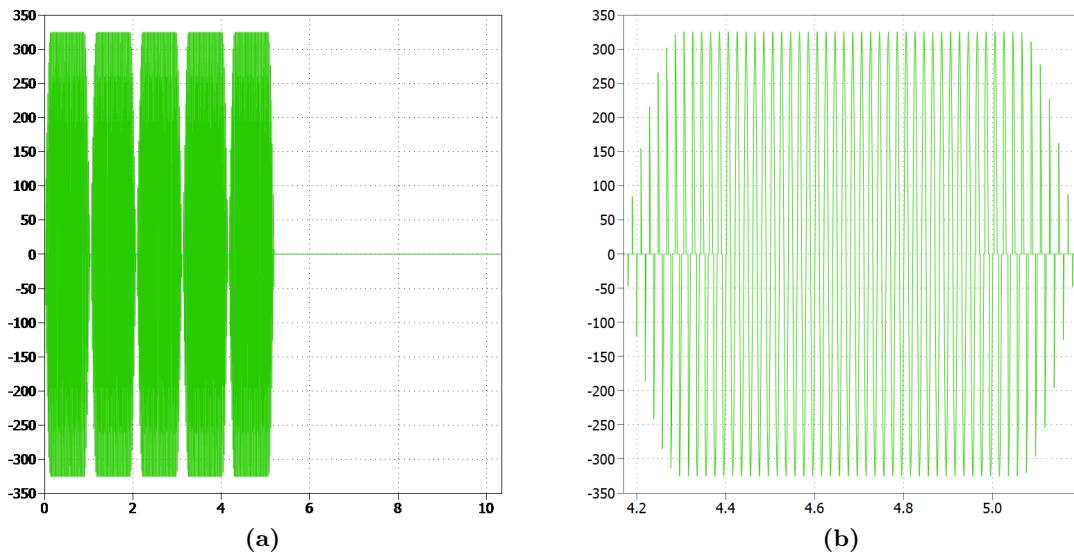


Abbildung 3.20: Einphasiges Sanft-Anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt

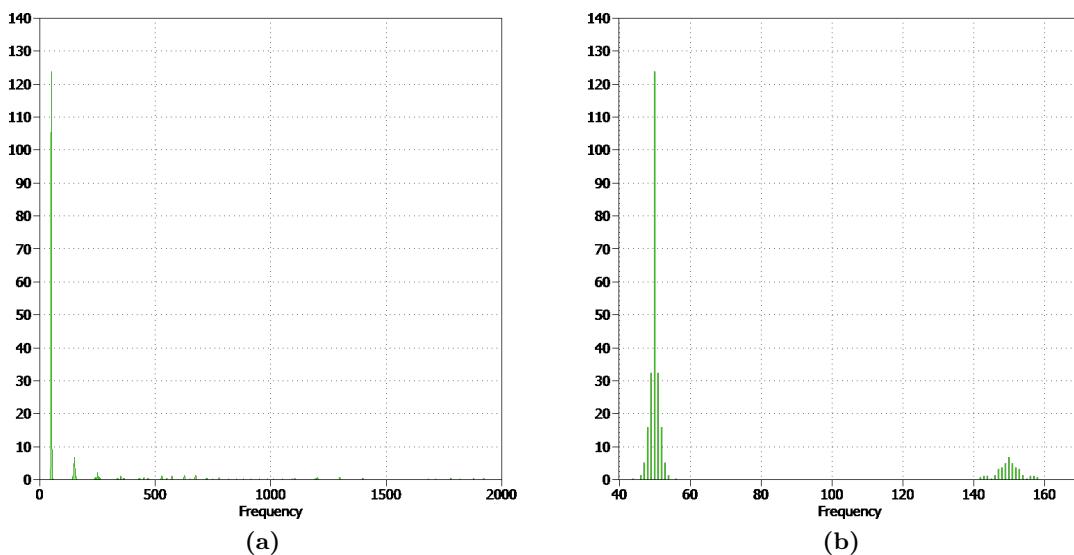


Abbildung 3.21: FFT des einphasigen Sanft anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 40 Hz - 170 Hz

3.2.7 Dreiphasige Kombination des Sanft-Anlassen

In der folgenden Abbildung 3.22 handelt es sich um eine dreiphasige Sanft-Anlasser Steuerung. Das dargestellte Spannungssignal hat einen duty cycle von 0.5 erkennbar in Bild 3.22a. Die Kurve und die Funktion der Spannung verhält sich ähnlich, wie die Kombination des einphasigen Sanft-Anlassen. Die drei Farben grün, rot und blau zeigen die verschiedenen Spannungen über den drei Widerständen an. Da es sich hier um eine rein ohmsche Last handelt, sind die Ströme phasengleich mit der Spannungen. Bei dem FFT erkennbar in Abbildung 3.23 von 0 Hz - 2000 Hz erkennt man den grössten Peak bei der Grundschwungung von 50 Hz. Die Sub- und Zwischenharmonischen Schwingungen fallen bei der sanftanlasser Steuerung viel mehr ins Gewicht als die Harmonischen. Sie sind nur noch minimal vorhanden.

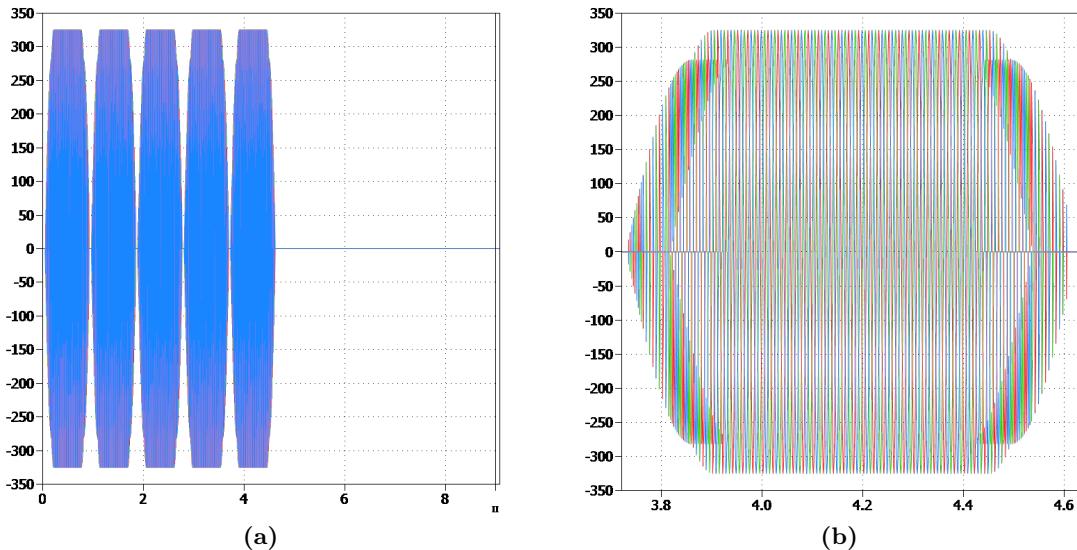


Abbildung 3.22: Dreiphasiges Sanft-Anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt

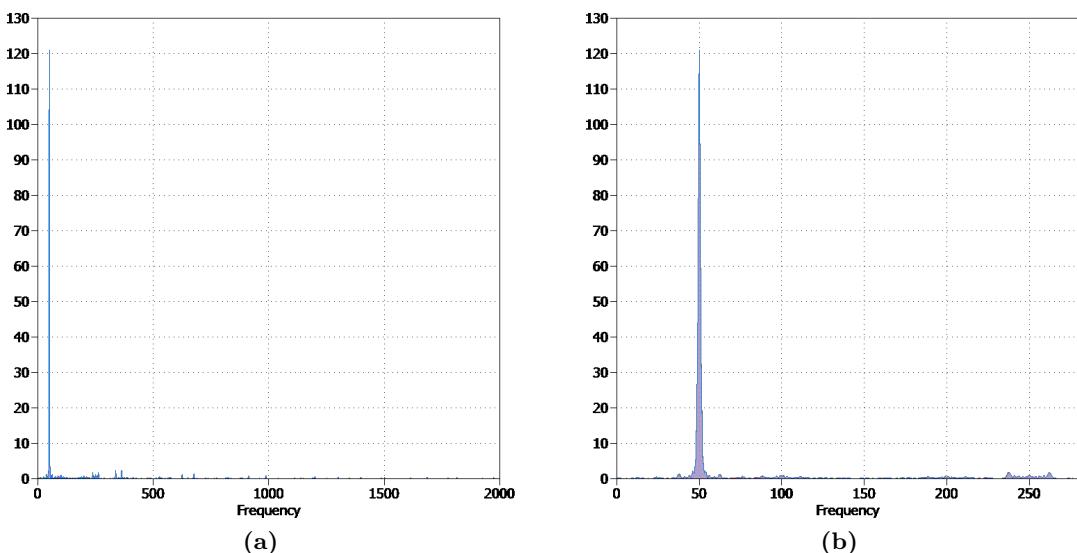


Abbildung 3.23: FTT des einphasigen Sanft anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz - 300 Hz

3.2.8 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



2-Phasen Ansteuerung mit Last in Dreieck



1-Phasen Ansteuerung mit Last in Stern



1-Phasen Ansteuerung mit Last in Dreieck



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 verwendet werden, dies hat jedoch den Nachteil, dass der Zündwinkel von Hand eingestellt werden muss. Jedoch kann die Ansteuerung auch über ein Spannungssignal von 0 V - 10 V 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 5 V erzeugen kann. Deshalb wurde eine Spannungsverstärkungsschaltung designet, 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 16Ω .

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.

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

evt. einfügen grafik Plecs

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

Dies resultiert in eine Verstärkung von:

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

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

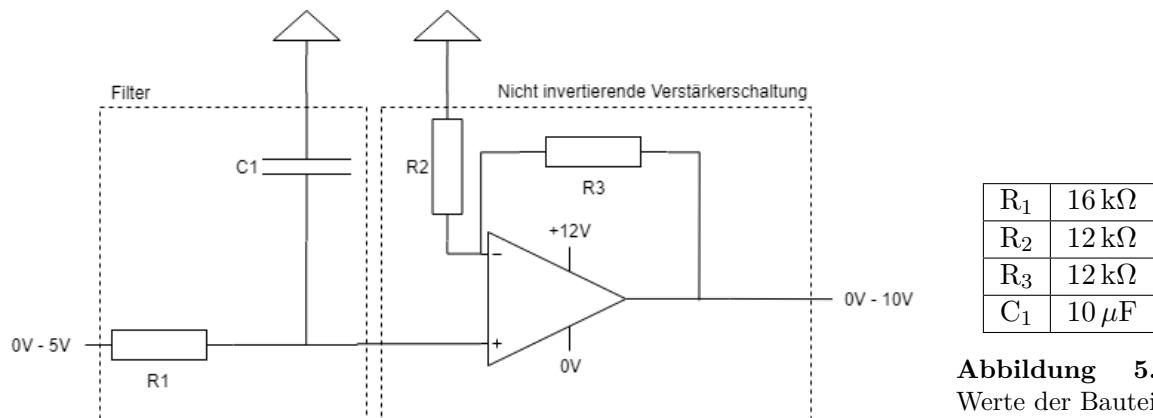


Abbildung 5.1: Schema Verstärkerschaltung

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 5.3 ersichtlich.

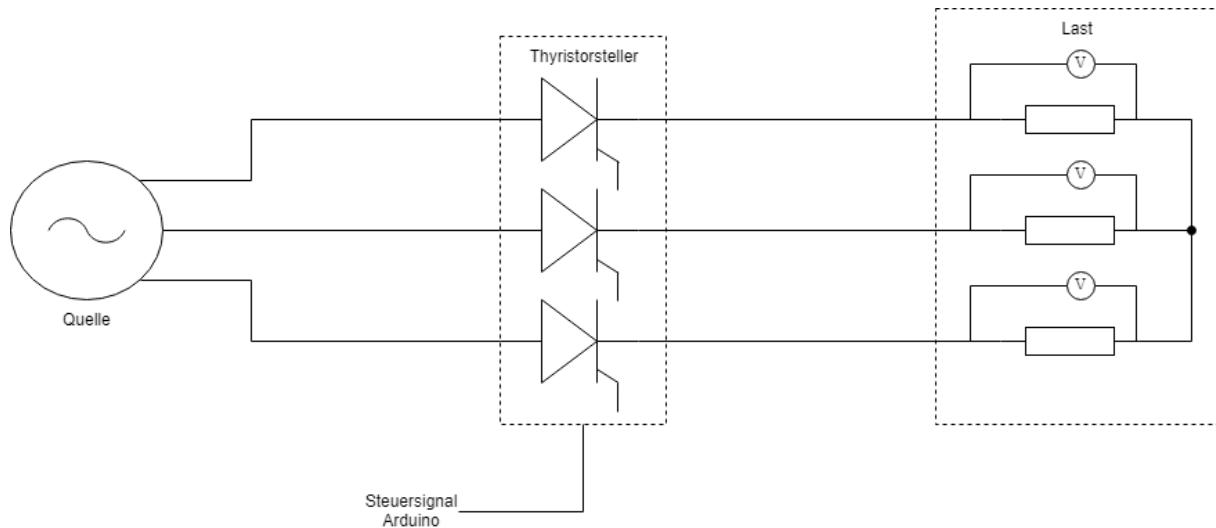


Abbildung 5.3: Schema Messaufbau

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 0 V bis 5 V 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.

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 V.

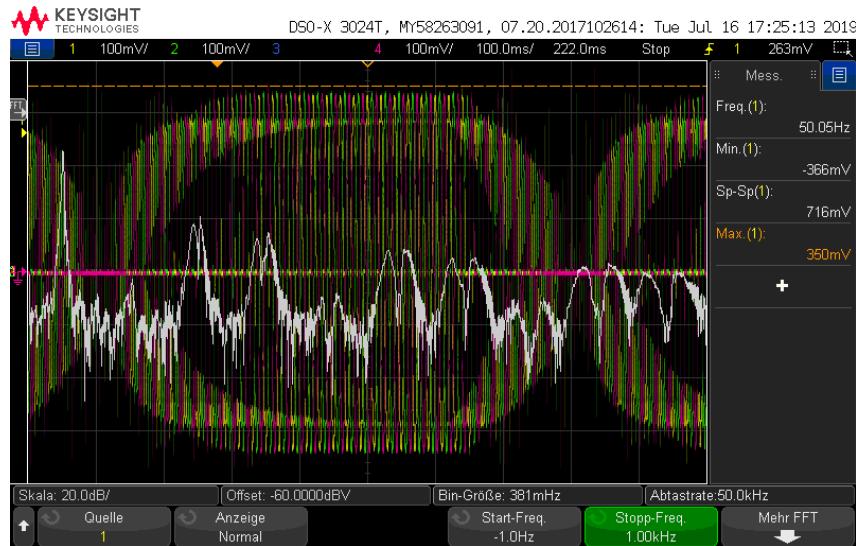


Abbildung 5.4: Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT

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.

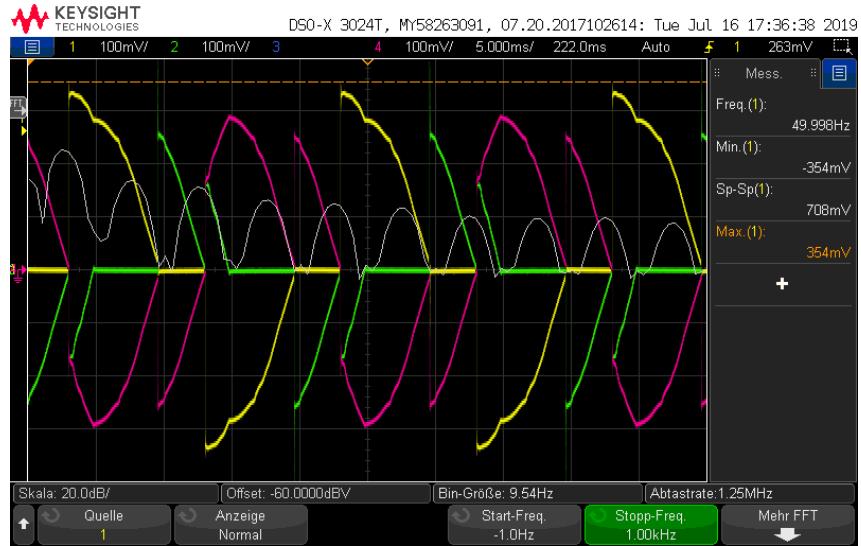


Abbildung 5.5: Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT

5.6 Phasenanschnittsteuerung mit 1 Thyristor mit Last in Stern

Für die Sparansteuerung wurde ein Winkel von 90° gewählt.

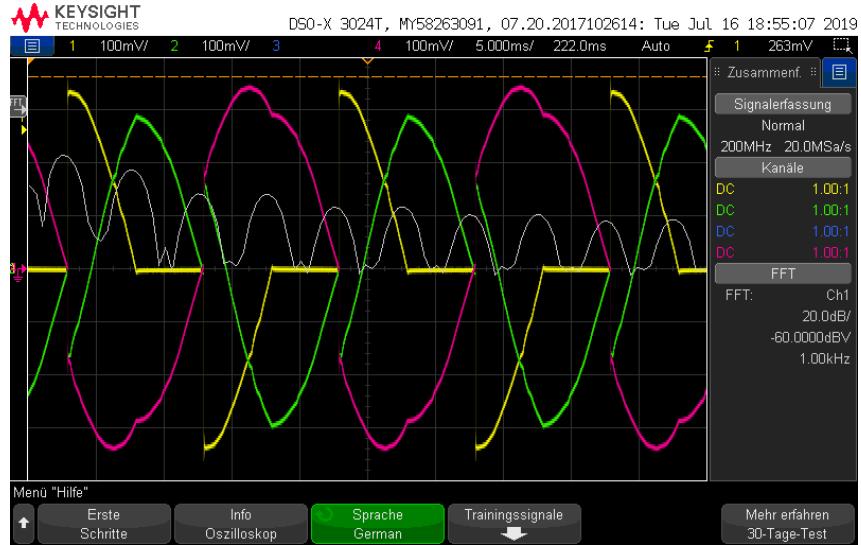


Abbildung 5.6: Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT

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] Alexander Kamenka. (2019). OBERSCHWINGUNGEN KAPITEL 1: OBERSCHWINGUNGEN – DIE GRUNDLAGEN, Adresse: <https://www.ihks-fachjournal.de/sechs-themen-um-overschwingungen-und-netzqualitaet-in-stromversorgungsnetzen/> (besucht am 4. Mai 2019).
- [2] C.Beneduce, *Analysis 3, Vorlesungsscript Teil 3*, 6. Mai 2019.
- [3] Dr. Rüdiger Paschotta. (2018). Phasenanschnittsteuerung, Adresse: <https://www.energie-lexikon.info/phasenanschnittsteuerung.html> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [4] WolfgangS. (2006). Schwingungspaketsteuerung, Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Schwingungspaketsteuerung.png> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [5] M. Meyer, *Leistungselektronik Einführung, Grundlagen, Überblick*. Springer Verlag, 1990.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundschwingung mit 3. Ordnung [1]	3
2.2	Grundschwingung mit 11. Ordnung [1]	3
2.3	Addition der verschiedenen Oberwellen [2]	4
2.4	Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz	7
2.5	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135°[3]	8
2.6	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45°[3]	9
2.7	Schwingungspaketsteuerung 2/3 der Leistung [4]	9
2.8	Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung	10
2.9	Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz	17
3.1	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°	21
3.2	Amplituden- und Phasenspektrum (a) 60° (b) 90°	22
3.3	Rekonstruiertes Signal (a) 60° (b) 90°	22
3.4	FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von 60°	23
3.5	FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von 90°	23
3.6	Schwingungspaket mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	24
3.7	Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	24
3.8	Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	25
3.9	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60°(b) 90°	26
3.10	Amplitudenspektrum (a) 60°(b) 90°	27
3.11	Schwingungspaket mit einem duty cycle (a) 0.5 (b) 0.8	27
3.12	Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz	28
3.13	Amplitudenspektrum mit einem duty cycle 0.8 von (a) 0 Hz - 100 Hz (b) 0 Hz - 1000 Hz	28

3.14 Lineares absolutes Spektrum mit einem duty cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	29
3.15 Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel 90°	29
3.16 dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60°(a) Signal (b) FFT	30
3.17 dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 90°(a) Signal (b) FFT	30
3.18 dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.5 (a) Signal (b) FFT . .	32
3.19 dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.8 (a) Signal (b) FFT . .	32
3.20 Einphasiges Sanft-Anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt	33
3.21 FTT des einphasigen Sanft anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 40 Hz - 170 Hz	33
3.22 Dreiphasiges Sanft-Anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt	34
3.23 FTT des einphasigen Sanft anlassen mit einem duty cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz - 300 Hz	34
5.1 Schema Verstärkerschaltung	38
5.2 Werte der Bauteile	38
5.3 Schema Messaufbau	38
5.4 Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT	40
5.5 Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT	41
5.6 Das Spannungssignal aller Phasen bei Schwingungspaketsteuerung mit FFT	41
B.1 Phasenanschnittsteuerung mit 30°(a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	50
B.2 Phasenanschnittsteuerung mit 45°(a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	50
B.3 Phasenanschnittsteuerung mit 120°(a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	50
B.4 Schwingungspaket mit duty cycle 0.2 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	51
B.5 Schwingungspaket mit duty cycle 0.4 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	51
B.6 Phasenanschnitt mit 30°simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	51
B.7 Phasenanschnitt mit 45°simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	52
B.8 Phasenanschnitt mit 120°simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	52
B.9 Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.2 simuliert mit Plecs (a) Eingangs- signal (b) Amplitudenspektrum	52

B.10 Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.4 simuliert mit Plecs (a) Eingangs-signal (b) Amplitudenspektrum	53
B.11 Vergleich der Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel von 90°	53
B.12 Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.5	53
B.13 Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8	54
B.14 Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8	54
B.15 Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8	54

Tabellenverzeichnis

2.1 Oberschwingungsfrequenzen	3
2.2 Grenzwerte für Geräte der Klasse A	16
2.3 Beobachtungsdauer für die Prüfung	16
2.4 Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspan-nungsnetz	19
2.5	20

A Matlab-Berechnungen

A.1 Leistungsfaktor

```
1 %Leistungsfaktor
2 %Phasenanschnitt
3 clc, clear all, close all hidden
4 alpha= linspace(0, 180, 180);
5 alphas= deg2rad(alpha);
6 ProzentAlpha= alphas/(pi)*100;
7
8 lambda_prov= sqrt(1-alphas/pi+1/(2*pi)*sin(2*alphas));
9 lambda_p= real(lambda_prov);
10 VP = 1-alphas/pi+1/(2*pi)*sin(2*alphas);
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')
```

A.2 Arduino-Programm

```

1 const int Switch_PO = 3;           // Output fuer den EIN- und
                                   AUSSCHALTER
2 const int Controll_P = 2;         // Output fuer Steuersignal
3 const int Switch_PI = 5;          // Input fuer den EIN- und AUSSCHALTER
4 int buttonState = 0;              // Zustand Schalter auf 0
5 int anzahl_Schwingungspakete = 5; // Anzahl Schwingungspakete
6
7 void setup() {
8 pinMode (Switch_PO, OUTPUT);      // Schalter auf Output
9 pinMode (Controll_P, OUTPUT);      // PWM auf Output
10 pinMode (Switch_PI, INPUT_PULLUP); // Schalter Eingang
11 }
12
13 void loop() {
14 buttonState =! digitalRead(Switch_PI); // Da Pullup wird das
                                         Signal negiert
15 if(buttonState == HIGH){           // if-Schleife falls Zustand
                                         Schalter auf EIN
16 for(int z=0; z<10; z++){        // for-Schleife fuer
                                         Schwingungspaketsteuerung
17 if(z<anzahl_Schwingungspakete){ // Anzahl
                                         Schwingungen EIN
18 for(int i=0; i<255; i++){       // Hochfahren mit PWM
19 analogWrite(Controll_P, i);    // Die Variable wird auf den
                                         Steuersignalausgang geschrieben
20 delay(5); // Kurze Zeitverzoegerung da sonst das PWM zu schnell fuer
               ein Multimeter hochfaehrt
21 }
22 delay(200); // Warten waehrend volle Leistung
23 for(int i=255; i>0; i--){       // Runterfahren mit PWM
24 analogWrite(Controll_P, i);    // Die Variable wird auf
                                         den Steuersignalausgang geschrieben
25 delay(5); // Kurze Zeitverzoegerung da sonst das PWM zu schnell fuer
               ein Multimeter runterfaehrt
26 }
27 delay(100); // Warten waehrend keiner Leistung
28 }else{
29 digitalWrite(Controll_P, LOW); // Ausschalten fuer Schwingungspakete
                                         keine Leistung
30 delay((10-anzahl_Schwingungspakete)*480); // Verzoegerung bis
                                         wieder eingeschaltet werden soll
31     }
32 }
33 }
34 }
```

B Vergleich der Resultate von Plecs und Matlab

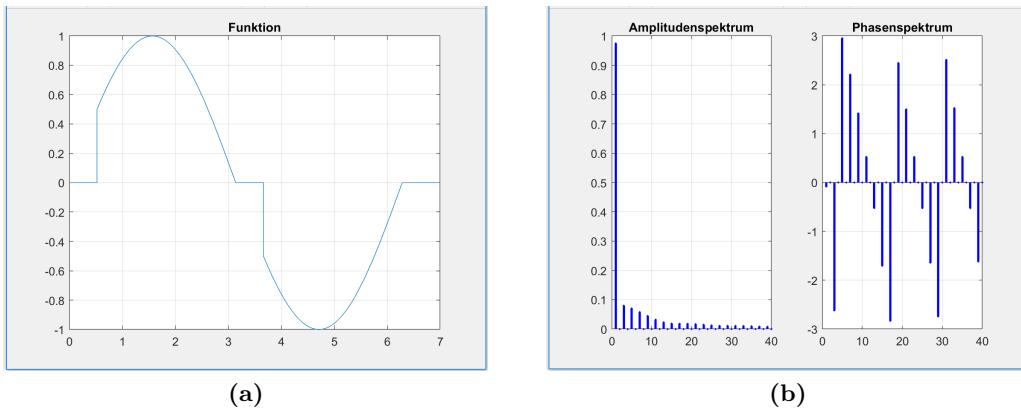


Abbildung B.1: Phasenanschnittsteuerung mit 30° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

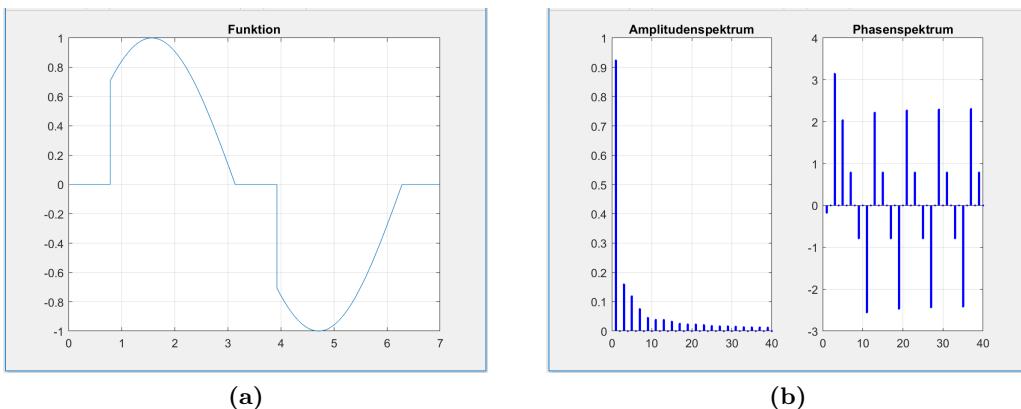


Abbildung B.2: Phasenanschnittsteuerung mit 45° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

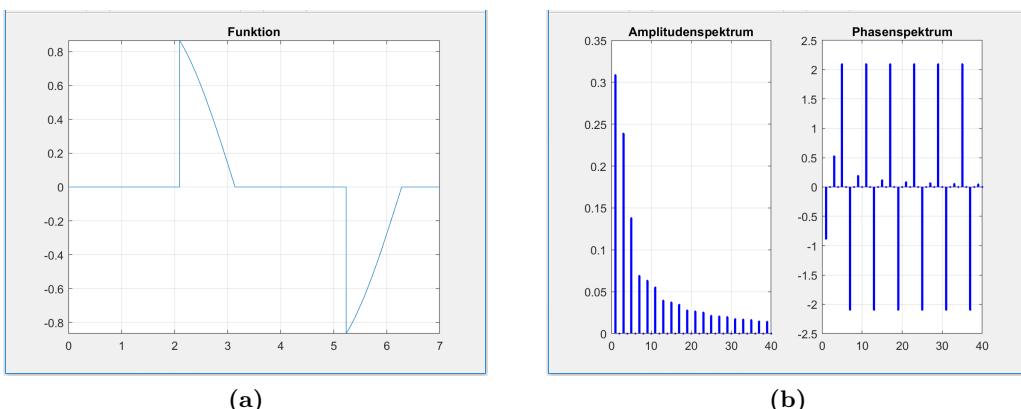


Abbildung B.3: Phasenanschnittsteuerung mit 120° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

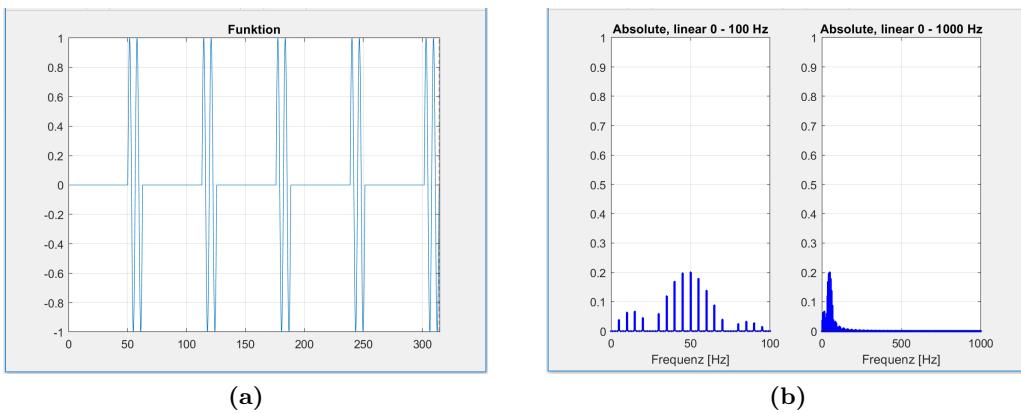


Abbildung B.4: Schwingungspaket mit duty cycle 0.2 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

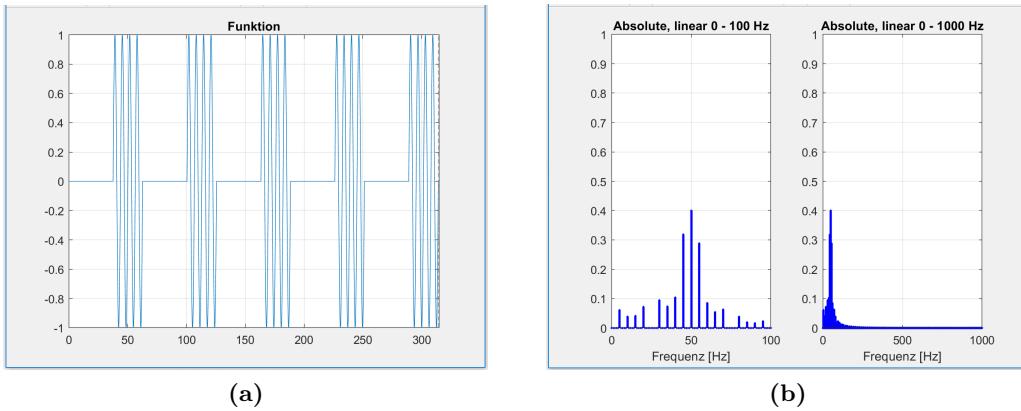


Abbildung B.5: Schwingungspaket mit duty cycle 0.4 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

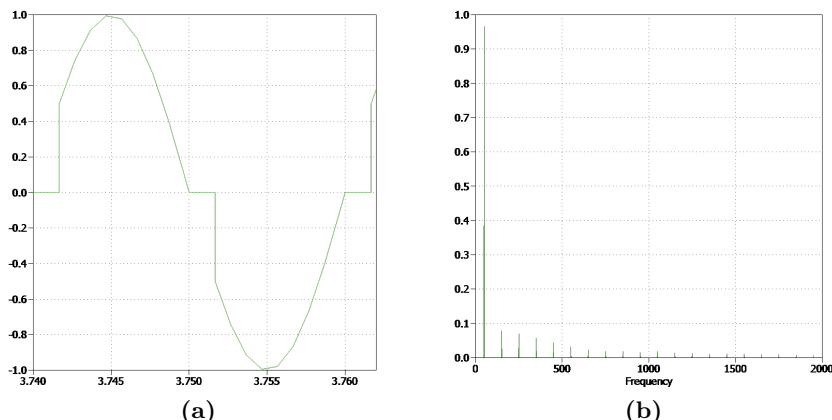


Abbildung B.6: Phasenanschnitt mit 30°simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

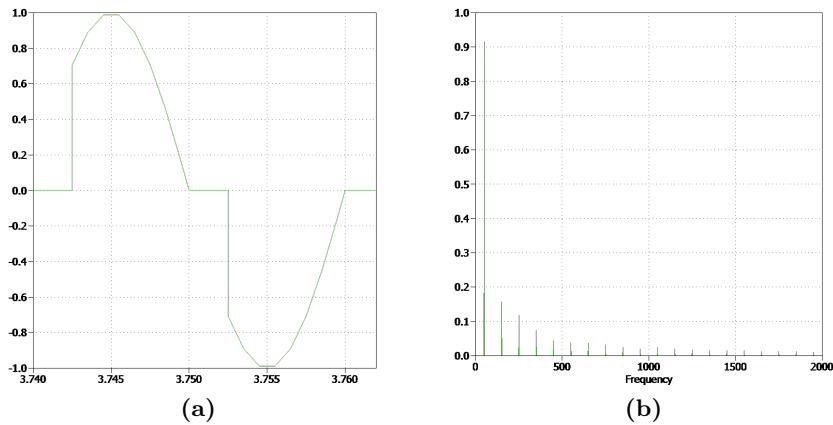


Abbildung B.7: Phasenanschnitt mit 45° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudens- und Phasenspektrum

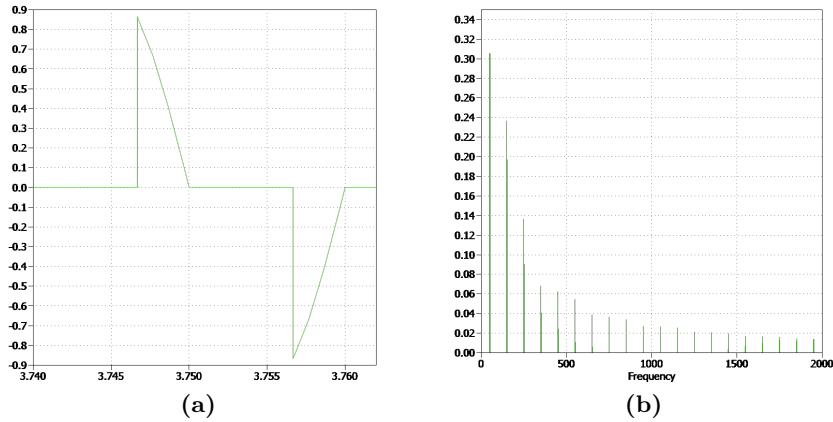


Abbildung B.8: Phasenanschnitt mit 120° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudens- und Phasenspektrum

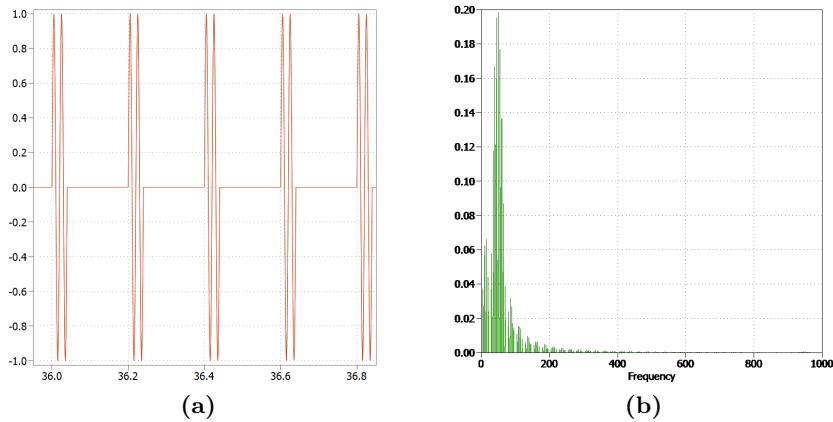


Abbildung B.9: Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.2 simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudenspektrum

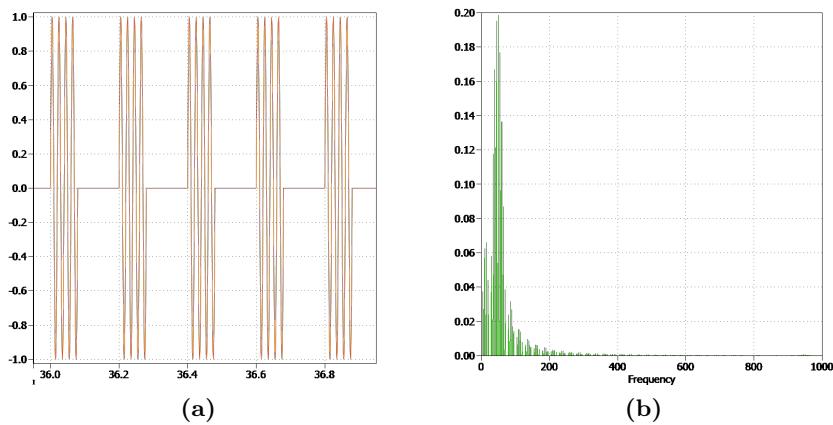


Abbildung B.10: Schwingungspaketsteuerung mit duty cycle 0.4 simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudenspektrum

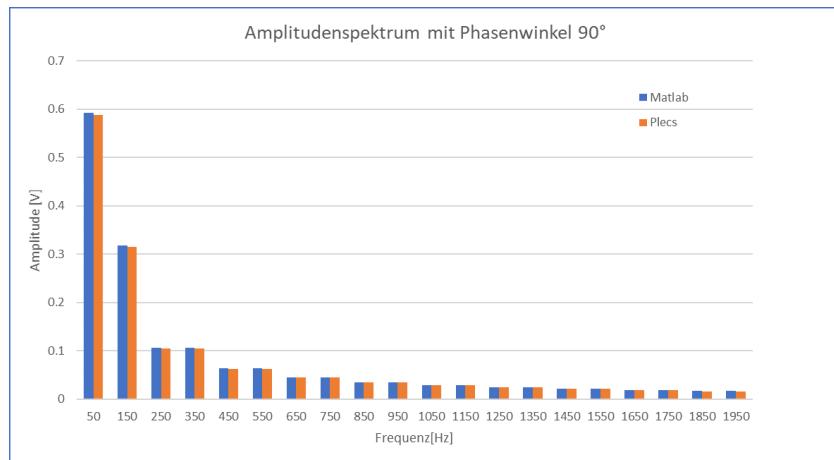


Abbildung B.11: Vergleich der Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel von 90°

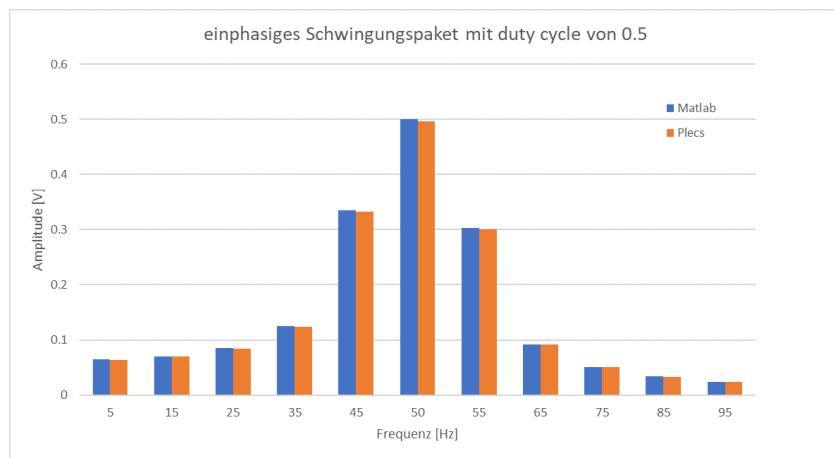


Abbildung B.12: Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.5

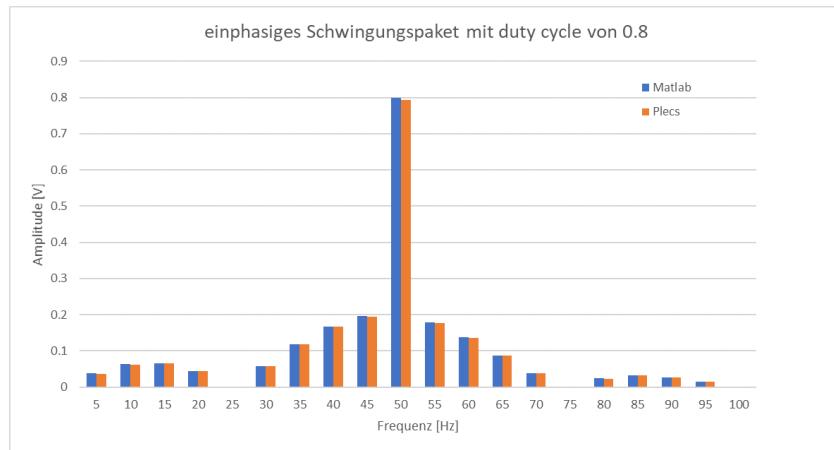


Abbildung B.13: Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8

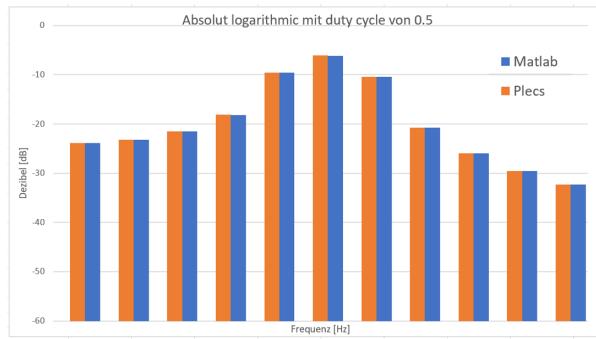


Abbildung B.14: Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8

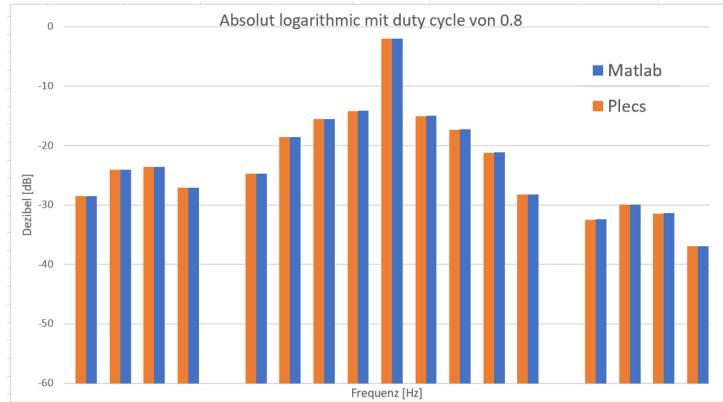


Abbildung B.15: Vergleich des Schwingungspaket mit duty cycle von 0.8