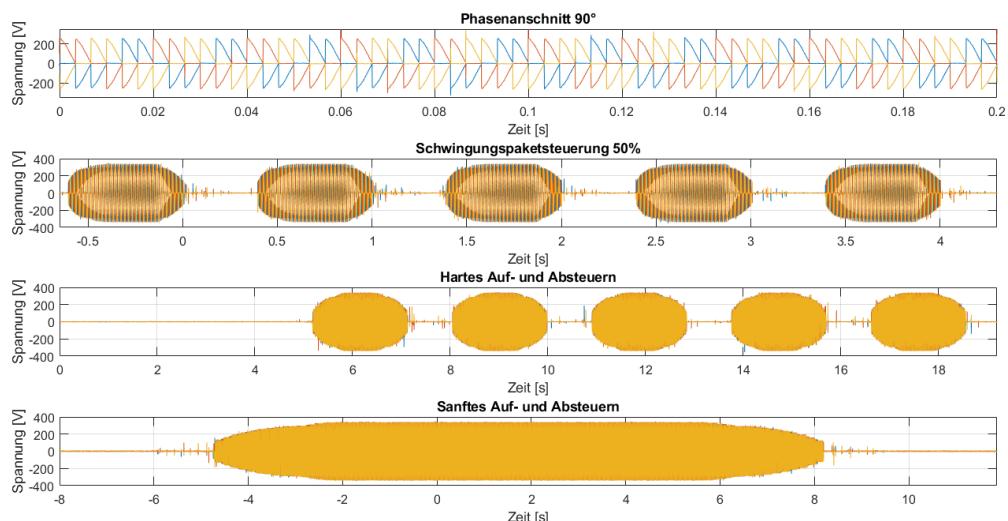


Netzrückwirkungen von Thyristorstellern mit ohmscher Last bei verschiedenen Steuerverfahren

Fachbericht Projekt 6

Windisch, 16.08.2019



Hochschule

Hochschule für Technik - FHNW

Studiengang

Elektro- und Informationstechnik

Autor

Nando Spiegel und Bastian van Dijke

Betreuer

Felix Jenni

Zusammenfassung

Heutzutage gibt es zwei geläufige Verfahren für die Ansteuerungen von elektrischen Geräten. Eine ist die Phasenanschnittsteuerung, die oft bei ohmschen Lasten verwendet wird. Bei dieser Methode treten mehrfach harmonische Schwingungen auf. Daher sind ihr vom Netzbetreiber einige Grenzen gesetzt. Die zweite Steuerungsart ist die Schwingungspaketsteuerung. Hierbei wird die Leistung während mehreren Netzperioden voll bezogen und danach wieder abgeschaltet. Dieses harte Ein- und Ausschalten des Verbrauchers erzeugt im Netz sub- und zwischenharmonische Schwingungen. Der Nachteil dieser Oberschwingungen sind, Verunreinigungen des öffentlichen Netzes. Sie können das Fehlverhalten von Betriebsmitteln hervorrufen oder sie sogar zerstören.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine dritte Variante entwickelt, um die Nachteile zu minimieren. Sie beinhaltet eine Kombination der beiden Steuerungsverfahren. Dabei wird das sanfte Hoch- und Runterfahren der Leistung mit der Phasenanschnittsteuerung ausgeführt. Die Schwingungspaketsteuerung kommt zu tragen, um die Anzahl Pakete Ein- und Auszuschalten.

Es zeigte sich, dass bei der neu entwickelten Methode die harmonischen Oberschwingungen zu einem minimalen Wert absinken. Sie halten somit die festgelegten Vorschriften des Netzbetreibers ein. Je sanfter die Steilheit des Ein- und Ausschalten der Leistung gewählt wurde, desto näher waren die Zwischenharmonischen bei den jeweiligen harmonischen Schwingungen, im Vergleich zur Schwingungspaketsteuerung. Außerdem waren die Seitenbänder viel dünner als bei der Paketsteuerung. Die Auswirkung dieser sub- und zwischenharmonischen Schwingungen konnten jedoch nicht genau analysiert werden.

Keywords: Phasenanschnitt, Schwingungspaket, Ohmsche Last

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Auswirkung von Oberschwingungen	2
2.2 Auftreten von verzerrten Sinusschwingungen	2
2.3 Definition der Oberschwingungen	3
2.4 Definition der zwischen- und subharmonischen Schwingungen	4
2.5 Definition der verzerrten Schwingung	5
2.6 Total Harmonic Distortion	6
2.7 Phasenanschnittsteuerung	7
2.8 Schwingungspaketsteuerung	8
2.9 Leistungsfaktor	9
2.9.1 Leistungsfaktor Phasenanschnittsteuerung	10
2.9.2 Leistungsfaktor Schwingungspaketsteuerung	11
2.10 Anforderung an die Netzqualität	11
2.11 Normen	11
2.11.1 EN 61000-3-2 Grenzwerte für Oberschwingungsströme	12
2.11.2 EN 61000-2-2 Grenzwerte für Oberschwingungsspannung	13
3 Simulationen	15
3.1 Simulation mit Matlab	15
3.1.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°	15
3.1.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.5 und 0.8 .	17
3.1.3 Sanftes- und Hartes Hoch- und Runterfahren	19
3.2 Simulation mit Plecs	21
3.2.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°	21
3.2.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.5 und 0.8 .	22
3.2.3 Vergleich der einphasigen Resultate mit Plecs und Matlab	22
3.2.4 Dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°	24
3.2.5 Dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycles von 0.5 und 0.8	26
3.2.6 Einphasige Kombination des Auf- und Absteuern	27
3.2.7 Dreiphasige Kombination des sanften Auf- und Absteuern	29
3.2.8 Alternative Ansteuerungen	30

4 Messaufbau	32
4.1 Laboraufbau	32
4.2 Laboraufbau mit einem Widerstand	34
4.3 Laboraufbau mit einer ASM	35
4.4 Arduino	35
4.4.1 Drehzahlmessung für eine Reglerauslegung	36
5 Resultate des Messaufbaus	38
5.1 Messungen Ströme	39
5.1.1 Messungen Widerstand	39
5.1.2 Messungen Asynchronmaschine	43
5.2 Messungen Spannungen	46
5.2.1 Messungen Widerstand	46
5.2.2 Messungen Asynchronmaschine	51
5.3 Sparvariante	56
5.3.1 Strommessung Sparvariante mit einem Widerstand und zwei Thyristoren	56
5.3.2 Spannungsmessung Sparvariante mit einem Widerstand und zwei Thyristoren	57
5.4 Leistungsfaktor	59
6 Interpretation der Resultate	60
6.1 Resultate der Ansteuerungsarten beim Widerstand	60
6.2 Resultate der Ansteuerungsarten bei der ASM	61
6.3 Vergleich der Messungen mit den Simulationen	62
7 Schlusswort	63
Literatur	65
Abbildungsverzeichnis	65
Tabellenverzeichnis	69
A Projektvereinbarung	71
B Code	73
B.1 Matlab Berechnungen	73
B.2 Arduino-Programm	81

C Zusammenfassung der Normen	85
C.0.1 EN 61000-3-2 Grenzwerte für Oberschwingungsströme	85
C.0.2 EN 61000-3-3 Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen	86
C.0.3 EN 61000-2-2 Grenzwerte für Oberschwingungsspannungen	89
D Vergleich der Resultate von Plecs und Matlab	91
E Messungen	98
E.1 Messungen Spannungen Widerstand	98
E.2 Messungen Spannungen ASM	99
E.3 Sparvariante für den Widerstand mit zwei Thyristoren	101
E.3.1 Sparvariante für die ASM mit zwei Thyristoren	104
E.4 Sparvariante für den Widerstand mit einem Thyristor	105
E.5 Vergleich Messungen Widerstand mit Simulation	108

1 Einleitung

In der Leistungselektronik werden ein- und dreiphasige Thyristorsteller seit Jahren für verschiedene Anwendungen eingesetzt. Dabei gibt es zwei beliebte Methoden, wie die Ansteuerung der Steller erfolgen kann. Die Phasenanschnitt-Steuerung ist eine geläufige Vorgehensweise, um die Leistung von ohmschen Lasten zu regulieren. Da bei dieser Steuerung jedoch harmonische Schwingungen (Vielfaches der Netzfrequenz) auftreten, sind ihnen vom Netzbetreiber einige Limiten gesetzt. Ein Beispiel dafür sind die zulässige Höchstwerten der Oberschwingungsströme bei den verschiedenen Ordnungen. 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 erzeugt neben den harmonischen, auch subharmonische Schwingungen (Bruchteile der Netzfrequenz). Diese Effekte sind im Netz unerwünscht, da die ordnungsmässige Funktion der Betriebsmittel beeinträchtigen und zu nicht sinus förmige Ströme und Spannungen führen. Eine alternative Variante, die die oben genannten Probleme vermindern könnte, wäre eine Kombination der beiden Steuerungsarten. Dabei würde man mit Hilfe der Phasenanschnittsteuerung das sanfte Hoch- und Runterfahren der Spannung regulieren. Zusätzlich würde mit einer solchen Schwingungspaketsteuerung die Anzahl Pakete des Auf- und Absteuerns eingeschaltet werden.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, ein solches Verfahren zu entwerfen und zu analysieren. Der Vergleich mit den bereits vorhandenen Steuerungsarten soll zeigen, dass eine Kombination der beiden Verfahren genutzt werden kann, um die verlustbehafteten Oberschwingungen zu minimieren. Mit einem geeigneten Messaufbau aller Varianten können die Unterschiede demonstriert werden.

Zunächst werden jedoch zuerst alle relevanten Informationen über die gängigen Steuerverfahren für ein- und dreiphasige Wechselspannungssteller zusammengetragen. Anschliessend sollen analytisch die harmonischen Oberschwingungen in Funktion zum Zündwinkel der Phasenanschnitt-Steuerung (ein- und dreiphasig) bestimmt werden. Auch die Harmonische in Funktion des Ein- und Ausschalt-Verhältnisses für Schwingungspaket-Steuerung sind ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Die Resultate aller Steuerungsverfahren, die man mit den Simulationstools Plecs und Matlab aufgebaut hat, werden mit einem geeigneten Laboraufbau verglichen. Danach betrachtet man ein Verfahren mit sanftem Hoch- und Runterfahren der Leistung und verifiziert die zugehörigen Simulationen mit den Messungen. Mithilfe eines Arduinos und einer kleinen Software kann schlussendlich die neu entwickelte Ansteuerung bei einer ohmschen Last und einem Asynchronmotor getestet werden. Bei den gefundenen Verfahren muss immer darauf geachtet werden, dass sie zwingend die Netzvorschriften einhalten.

Die vorliegende Projektarbeit gliedert sich in 5 Kapitel. Im ersten Teil werden die wichtigsten Grundlagen erläutert. Dies sind die Funktion der einzelnen behandelten Steuerungsarten, die damit auftretenden Probleme und die Formeln, die für die Berechnungen der verschiedenen Spektren, verwendet wurden. Ausserdem werden die wichtigsten Normen kurz zusammengefasst. Im Kapitel Simulation sind alle Resultate der simulierten Verfahren, welche mit Plecs und Matlab dargestellt sind, aufgezeigt. Zusätzlich wurden die Resultate der beiden Simulationsprogrammen miteinander verglichen und gegenseitig verifiziert. Das 4. Kapitel beinhaltet den Messaufbau sowie alle Komponenten, die verwendet wurden, um einen geeigneten Laboraufbau zu erstellen. Anschliessend sind im Kapitel 5 die Resultate des Messaufbaus vorgestellt. Am Ende folgt im Kapitel 6 die Diskussion zu den verschiedenen Ansteuerungsverfahren und es wird ein abschliessendes Fazit gezogen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, die für das Grundverständnis dieser Arbeit relevant sind, aufgelistet. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den beiden häufigsten Steuerverfahren für ohmsche Lasten: die Phasenanschnitt- und die Schwingungspaketsteuerung. Nachteile solcher Verfahren sind verzerrte Signale, die fast nicht zu vermeiden sind. Deshalb sieht das vorliegende Konzept eine Kombination beider Steuerungsverfahren vor, wodurch eine optimale Steuerung erreicht werden soll. Daher werden nachfolgend das Aufkommen und die Auswirkungen von Oberschwingungen sowie zwischen- und subharmonischen Schwingungen erläutert. Thematisiert werden auch die Normen, die zwingend eingehalten werden müssen, denn sie setzen beiden Verfahren Grenzen.

2.1 Auswirkung von Oberschwingungen

Falls Oberschwingungen oder andere Netzrückwirkungen bei Betriebsmitteln auftreten, können die Geräte in ihrer Funktion beeinträchtigt oder sogar zerstört werden. Ein Beispiel dafür ist, bei kurzen Spannungsunterbrechungen, würden Schaltnetzteile mit extrem hohen Einschaltstromspitzen reagieren. Diese Spitzen könnten das 20-fache der Nennlast erreichen. Grund dafür ist, dass im einphasigen Verbrauch der ganze Rückleitstrom über den Sternpunkt des Transformators zurückfließt. Gibt es viele Schaltnetzteile in einem System, heben sich die Rückleiterströme nicht mehr auf, sondern sie addieren sich. Die Folge davon ist eine Sternpunktverschiebung. Außerdem können die Oberschwingungen zum Beispiel bei Glühbirnen die Glühladentemperatur erhöhen und somit ihre Lebensdauer verkürzen. Auch bei Dreh- oder Wechselstrommotoren und -generatoren führen Stromoberschwingungen zu zusätzlicher Erwärmung. Bei Schutzgeräten wie Distanzschutz, Überstromschutz oder Differenzialschutz können Oberschwingungen den Aufbau und die Wirkungsweise des Gerätes beeinflussen. Sind die Abstände zwischen Freileitungen und Telefonleitungen zu gering, können die Oberschwingungen auch die Sprachübertragung stören.

2.2 Auftreten 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. Außerdem können bei den Oberschwingungsströmen 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 ernst zu nehmendes Problem für die Versorgungsbetriebe, die Verteilnetzbetreiber und für den Endkunden, da fast jedes elektrische Gerät verzerrte Signale zurückspeist und so das Netz verunreinigt. Die grösste Herausforderung war früher die Auswirkungen von Oberschwingungsverzerrungen auf elektrische Maschinen zu erkennen. Außerdem stellte man fest, dass Störungen in den Telefonleitungen auftraten, welche die Übertragung der Sprache beeinträchtigte. Allerdings kann man sagen, dass Oberschwingungsverzerrungen früher ein geringeres Gefahrenpotenzial 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 deshalb die weltweite Nachfrage nach energieeffizienten Lösungen, die nur über vermehrten Einsatz von Leistungselektronik realisierbar sind.

2.3 Definition der Oberschwingungen

Die Oberschwingungen gehören in den Themenbereich “physische Eigenwertprobleme”, folglich Wellen deren Frequenz ganzzahlige Vielfache der Grundschwingungen sind. In der Musikwelt hört man Oberschwingungsfrequenzen vor allem bei Saiteninstrumenten, 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 saubere 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 jedoch nicht ganz korrekt. Eine Welle hat eine räumliche und zeitliche Ausdehnung. Die hier betrachteten Schwingungen haben aber 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. Die Tabelle 2.1 beinhaltet die Ordnungszahlen (n) in Bezug zur Frequenz (f_h). Es ist ersichtlich, dass zum Beispiel die 5. Oberschwingung eine Frequenz von 250 Hz hat. Die Berechnung der Oberschwingungsfrequenz erkennt man in der Formel 2.1.

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

Ordnungszahl n	Oberschwingungsfrequenz (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 Signale dargestellt werden. In Kapitel 2.5 ist dies mit einem verzerrten Signal erläutert.

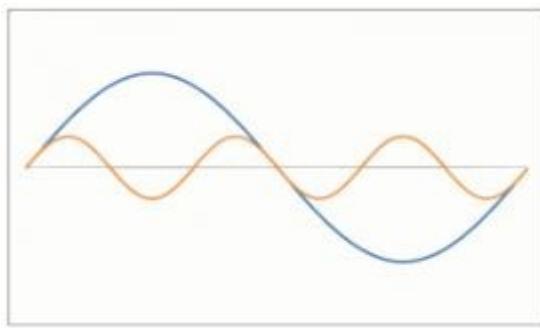


Abbildung 2.1: Grundschwingung mit 3. Ordnung [1]

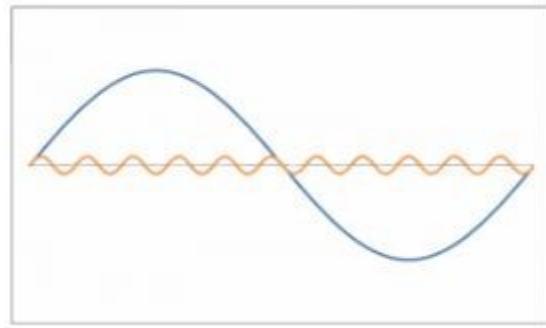


Abbildung 2.2: Grundschwingung mit 11. Ordnung [1]

2.4 Definition der zwischen- und subharmonischen 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. Die zwei Schwingungsarten sind in der Abbildung 2.3 dargestellt. 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 Phänomens 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.

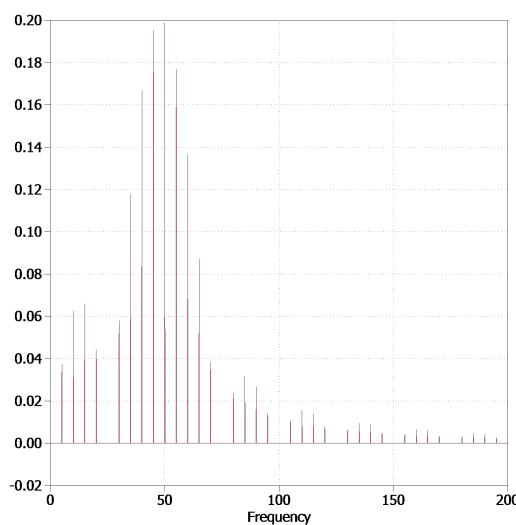


Abbildung 2.3: Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz

2.5 Definition der verzerrten 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 Abbildung 2.4 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.

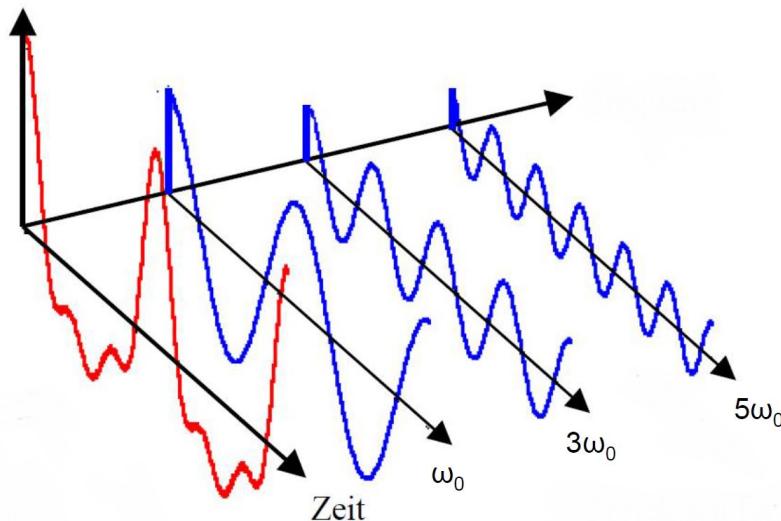


Abbildung 2.4: Addition der verschiedenen Oberwellen [2]

Mit 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 ein Phasenspektrum betrachtet. In der Praxis wird dieses Spektrum oft einfach weggelassen. Jedoch benötigt man für die Rekonstruktion des Eingangssignals zwingend beide Spektren. Im Kapitel 3.1 konnte von Hand mit der folgenden Fourier-Reihe eine beliebige periodische Funktion als Summe von Sinus- und Cosinus-Funktionen dargestellt werden.

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

Mathematisch werden die Fourier-Koeffizienten a_0 , a_n und b_n mit den untenstehenden Formeln berechnet. Sie gelten im Frequenzbereich von 0 bis 2π :

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

$$a_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(n \cdot \omega_0 \cdot x) dx \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(n \cdot \omega_0 \cdot x) dx \quad (2.5)$$

Mit den oben genannten Fourier-Koeffizienten lassen sich nun das Amplituden- und Phasenspektrum von verschiedene Signalen berechnen. Die verschiedenen harmonischen Schwingungen aber auch die Sub- und Zwischenharmonischen können so ersichtlich in einem Frequenzspektrum dargestellt werden. Mit den Formeln 2.6 und 2.7 berechnet man das Amplituden- und Phasenspektrum:

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

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

2.6 Total Harmonic Distortion

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). Dieser Wert ist ausschlaggebend, 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, siehe Formel 2.9, und die Verzerrung der Spannung als *THDu*, Formel 2.10, angegeben. Der *THC* (Total Harmonic Current) bezeichnet den gesamten 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 sind durch die Norm so definiert, siehe Formel 2.8.

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

Die Oberschwingungsströme, welche durch die Verbraucher in Netzwerken erzeugt werden, müssen durch die Impedanzen der Transformatoren oder Drosseln fließen. 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*. Diese 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 2.9 berechnet die totale Verzerrung des Stromes(*THDi*) in Prozent.

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

Parallel dazu berechnet die Formel 2.10 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).

2.7 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. Der Vorteil bei einer solchen Schaltung ist der sehr geringe Leistungsverlust bei der Regelung der Spannung und des Stromes. Zudem ist die Phasenanschnittsteuerung viel kompakter aufgebaut als komplizierte regelbare Schaltnetzteile, die auch einen geringen Leistungsverlust haben. 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 Verzerrungsblindleistung auf. Der Strom eilt zeitlich der Spannung nach und die Last wirkt so wie eine Induktivität. Deshalb wird dieses Verfahren von den Elektrizitätswerken nur bei kleinen Leistungen, bei symmetrischen Anschnittsteuerung von Wärmegeräten toleriert. Bei grösseren Leistungen wird die Schwingungspaketsteuerung verwendet. In 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 bei einem Winkel von 135° . 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.

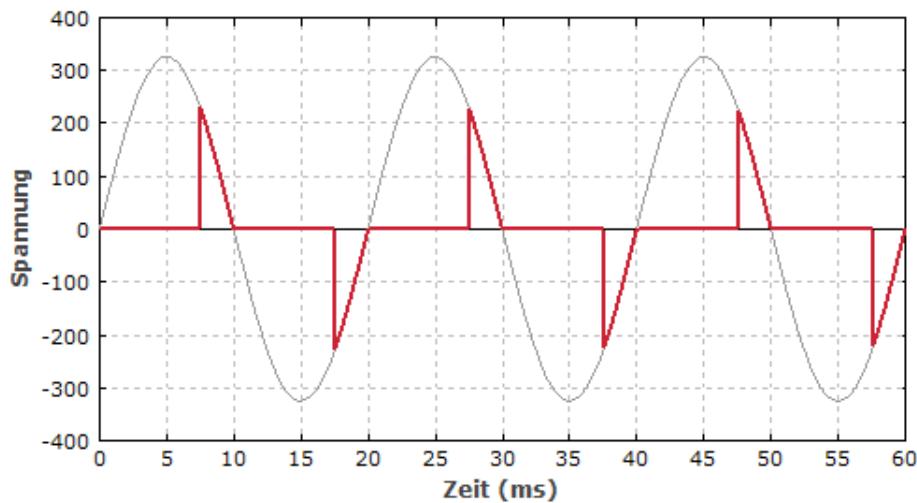


Abbildung 2.5: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [3]

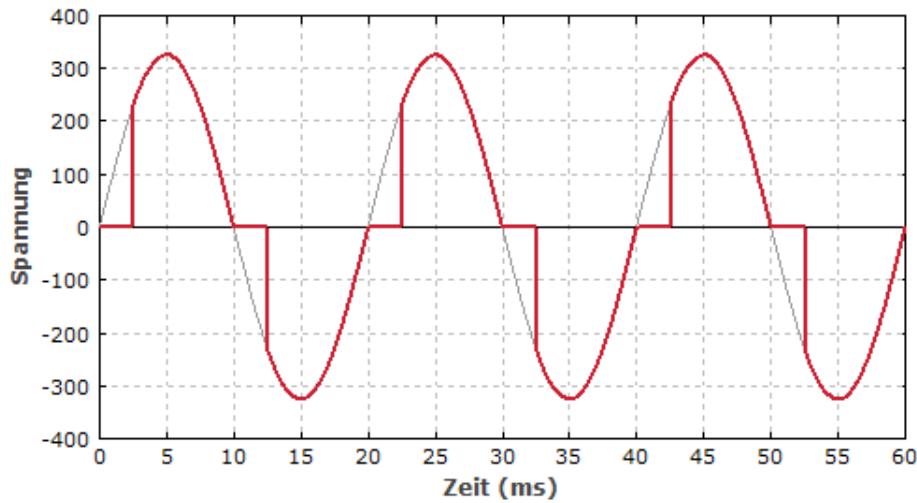


Abbildung 2.6: Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45° [3]

In der Abbildung 2.6 ist ersichtlich, dass die Phase früher gezündet wurde, wodurch an der Last eine grössere Leistung resultiert.

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 dabei ist, dass nahezu keine Verschiebungsblindleistung in der Grundschwingung auftritt. Die Verluste von elektrischen Geräten können so minimiert werden. Die Paketdauer T_0 und die Einschaltzeit T_E sind bei der Schwingungspaketsteuerung von grosser Wichtigkeit, 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 theoretisch keine harmonischen Oberwellen, dafür treten aber sub- und zwischenharmonische Schwingungen auf. In 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.

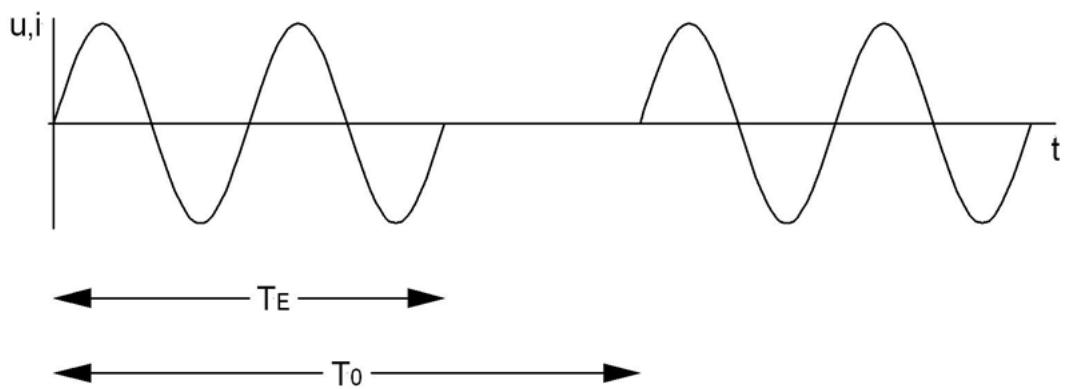


Abbildung 2.7: Schwingungspaketsteuerung $2/3$ der Leistung [4]

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 in der Leistungselektronik meistens dafür verwendet, um das Verhältnis des Betrages der Wirkleistung P zur Scheinleistung S anzuzeigen. 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 die beiden Ansteuerungsverfahren zu vergleichen, ist der Leistungsfaktor der Verfahren zu bestimmen. Bei der Phasenanschnittsteuerung geht der Leistungsfaktor bei einem kleinem 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 entsprechend auch der Leistungsfaktor. Bei der Schwingungspaketsteuerung ist der Leistungsfaktor abhängig von dem Verhältnis der Einschaltzeitdauer der Pakete zu den Netzperioden. Je grösser die Einschaltzeit ist, desto grösser ist der Leistungsfaktor. Die genauere Herleitung der beiden Faktoren 2.20 und 2.24 sind im Unterkapitel 2.9.1 und 2.9.2 beschrieben. In der Abbildung 2.8 ist ersichtlich, wie sich der Leistungsfaktor bei den beiden Steuerungsarten verhält [5].

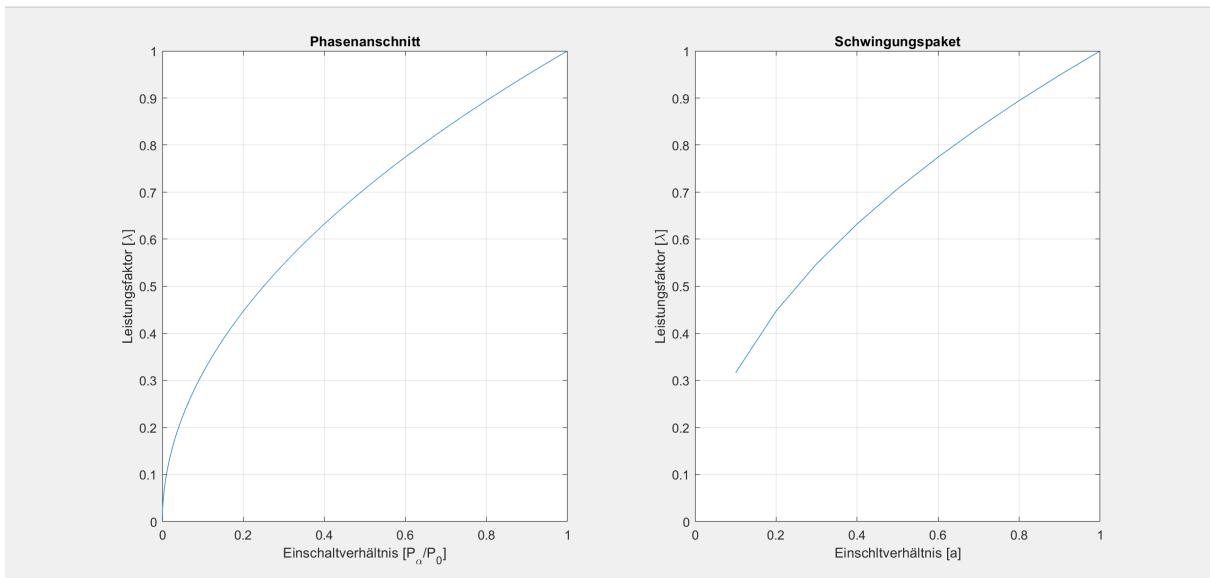


Abbildung 2.8: Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung

Der Vergleich zeigt, dass sich 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 einen 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 [5].

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

Ist 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 die 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 ohmschen 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:[5]

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

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

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

«««< HEAD Um die Anforderungen der Netzqualität zu gewährleisten, müssen die Normen eingehalten werden. Welche Normen relevant für die vorliegende Arbeit sind, wird im Kapitel 2.11 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 verändert werden.
===== Um die Anforderungen der Netzqualität zu gewährleisten, müssen die Normen eingehalten werden. Welche Normen relevant für die vorliegende Arbeit sind, wird im Kapitel 2.11 erläutert. Zweck der Normen ist es, die verschiedenen 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 verändert werden.

»»»> master

2.11 Normen

«««< HEAD Bei der Formulierung "Normen" handelt es sich um eine Herausgabe von Regeln, Merkmale oder Leitlinien, die von verschiedenen Organisationen und deren Expertengruppen, wie die deutsche Kommission für Elektrotechnik, bestimmt wurden. Die gesicherten Ergebnisse, welche auf Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren, dokumentierte man sorgfältig zum Beispiel in den EN-Normen. Wie erwähnt, müssen verschiedene Geräte bestimmte Normen einhalten, um Störungen und Verzerrungen im Netz zu vermeiden. Vorliegende Arbeit stützt sich bei der Erarbeitung der Grenzwerten für harmonische Oberschwingungsströme und Oberschwingungsspannungen und Zwischenharmonische Oberschwingungsspannungen auf die Normen EN 61000 3-2 [6] und EN 61000 2-2 [7]. Die Grenzwerte von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker für Geräte mit einer Bemessungsstrom von 16 A, welche in der Norm

EN 61000 3-3 [8] aufgezeigt ist, wurden ebenfalls untersucht. Da man für diesen Vergleich einen bestimmten Versuchsaufbau und Prüfling benötigt, ging man nicht weiter auf diese Norm ein. Nachfolgend sind die für diese Arbeit relevanten Tabellen und Spezifikationen der Normen im Detail erläutert. Eine Zusammenfassung aller drei Normen, auch die der EN 61000 3-3, findet man im Anhang.C ===== Bei der Formulierung "Normen" handelt es sich um eine Herausgabe von Regeln, Merkmale oder Leitlinien, die von verschiedenen Organisatoren und deren Expertengruppen, wie die deutsche Kommission für Elektrotechnik, bestimmt wurden. Die gesicherten Ergebnisse, welche auf Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren, dokumentierte man sorgfältig zum Beispiel in den EN-Normen. Wie erwähnt, müssen verschiedene Geräte bestimmte Normen einhalten, um Störungen und Verzerrungen im Netz zu vermeiden. Vorliegende Arbeit stützt sich bei der Erarbeitung der Grenzwerten für harmonische Oberschwingungsströme und Oberschwingungsspannungen und Zwischenharmonische Oberschwingungsspannungen auf die Normen EN 61000 3-2 und EN 61000 2-2. Die Grenzwerte von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker für Geräte mit einer Bemessungsstrom von 16 A, welche in der Norm EN 61000 3-3 aufgezeigt ist, wurden ebenfalls untersucht. Da man für diesen Vergleich einen bestimmten Versuchsaufbau und Prüfling benötigt, ging man nicht weiter auf diese Norm ein. Nachfolgend sind die für diese Arbeit relevanten Tabellen und Spezifikationen der Normen im Detail erläutert. Eine Zusammenfassung aller drei Normen, auch die der EN 61000 3-3, findet man im Anhang im Kapitel C. »»> master

2.11.1 EN 61000-3-2 Grenzwerte für Oberschwingungsströme

In der Norm 61000-3-2 sind 4 Geräteklassen definiert, bei denen die Oberschwingungen des Eingangsstromes die Werte nicht überschreiten dürfen. Da es sich beim vorliegenden 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 der Vollständigkeit halber aufgelistet.

Klasse B:

- tragbare Elektrowerkzeuge
- Lichtbogenschweisseneinrichtungen, 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 [6]:

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

2.11.2 EN 61000-2-2 Grenzwerte für Oberschwingungsspannung

Die folgende Norm beinhaltet die Festlegung für Verträglichkeitspegel von niederfrequenten, leitungsgeführten Störgrößen und für Signale von Netz-Kommunikationssystemen in öffentlichen Niederspannungs- und Stromversorgungsnetzen.

Die Tabelle 2.3 zeigt die verschiedenen Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz. Sie ist 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 im stationären Betrieb.

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

Tabelle 2.3: Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz

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

$$k = 1.3 + \frac{0.7}{45} \cdot (h - 5) \quad (2.25)$$

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

Die Tabelle 2.4 zeigt die erforderlichen Werte in Prozent der subharmonischen Spannung im Niederspannungsnetz bei 230V, bei einer Frequenz von 10Hz bis 90Hz. Sie entsprechen dem Kompatibilitätsgrad bezüglich des Flimmers.

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 2.4: Erforderlichen Werte der subharmonischen Spannungen

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 Geräte, wie zum Beispiel Fernsehempfängern. Jede Verwendung von Strom und Spannungen, bei der die Höhe der Amplitude oder der Zeitpunkt des Nulldurchgangs wichtig ist, kann somit gestört werden, wenn die Kombination der vorhandenen unerwünschten Frequenz diese Eigenschaften der Versorgungsspannung 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 [7].

3 Simulationen

Die Simulationen sollen Kenntnisse und erste Einblicke bezüglich der beiden Steuerungsverfahren der Phasenanschnitt- sowie Schwingungspaketsteuerung liefern. Dazu werden die beiden Verfahren sowohl mit Plecs als auch in Matlab simuliert und die Resultate auf ihre Richtigkeit geprüft. Zuerst wird auf die Simulation mit Matlab eingegangen, danach diejenigen mit Plecs erläutert.

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 wurden. Die verwendeten Berechnungen des Amplituden- und Phasenspektrums sind im Kapitel 2.5 ersichtlich.

3.1.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Als Erstes simulierte man eine periodische Sinusfunktion im Zeitbereich mit verschiedenen Phasenanschnittswinkeln. Die Periodenlänge ist definiert 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 Abbildung 3.1a erkennt man die Sinusfunktion mit einem Phasenanschnitt von 60° und in der Abbildung 3.1b einen mit 90° . Weitere Funktionen mit anderen Anschnittswinkeln sind im Anhang D ersichtlich.

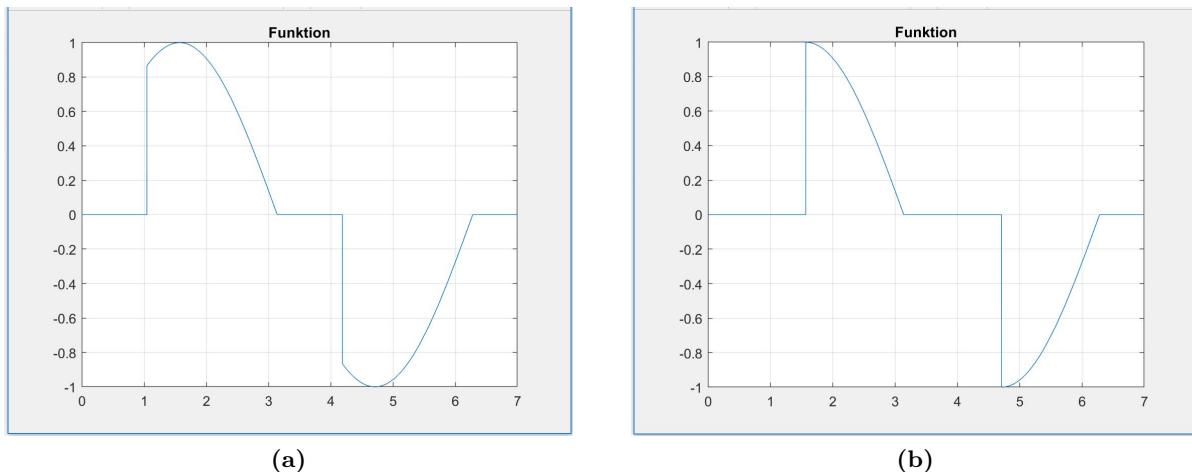


Abbildung 3.1: Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°

Nachdem man die Funktion konstruiert hat, wird diese in die einzelnen Frequenzanteile zerlegt. Man bezeichnet dies als Fourier-Analyse. Gemäss Formel 2.3, 2.4 und 2.5 konnten die Fourier-Koeffizienten a_0 , a_n und b_n berechnet werden. Anschliessend wurden das Amplitudenspektrum und Phasenspektrum mit den Formeln 2.6 und 2.7 bestimmt.

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 der Grafik 3.2 erkennt man das Amplitudens- und Phasenspektrum des in Abbildung 3.1 dargestellten Signale mit den Winkeln von 3.2a 60° und 3.2b 90° .

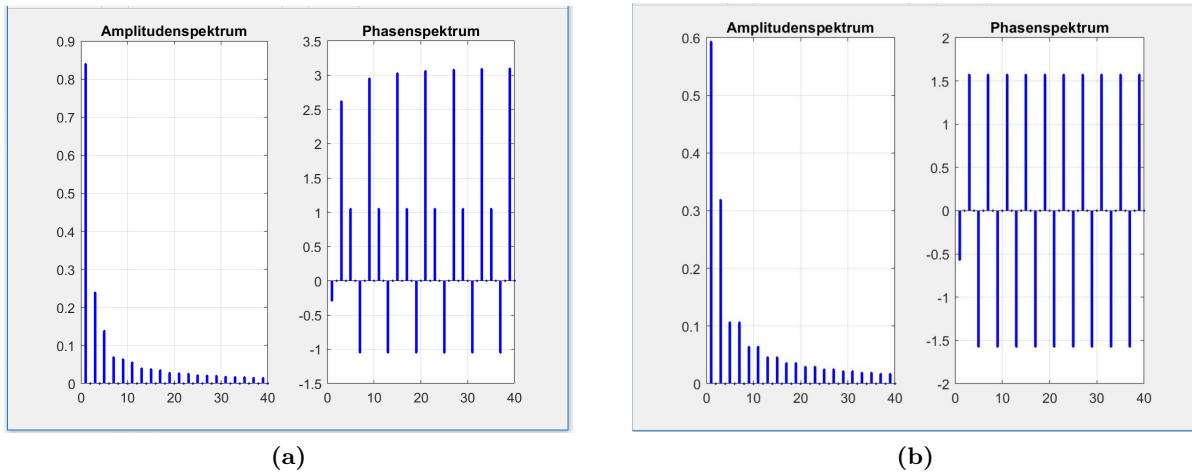


Abbildung 3.2: Amplituden- und Phasenspektrum (a) 60° (b) 90°

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

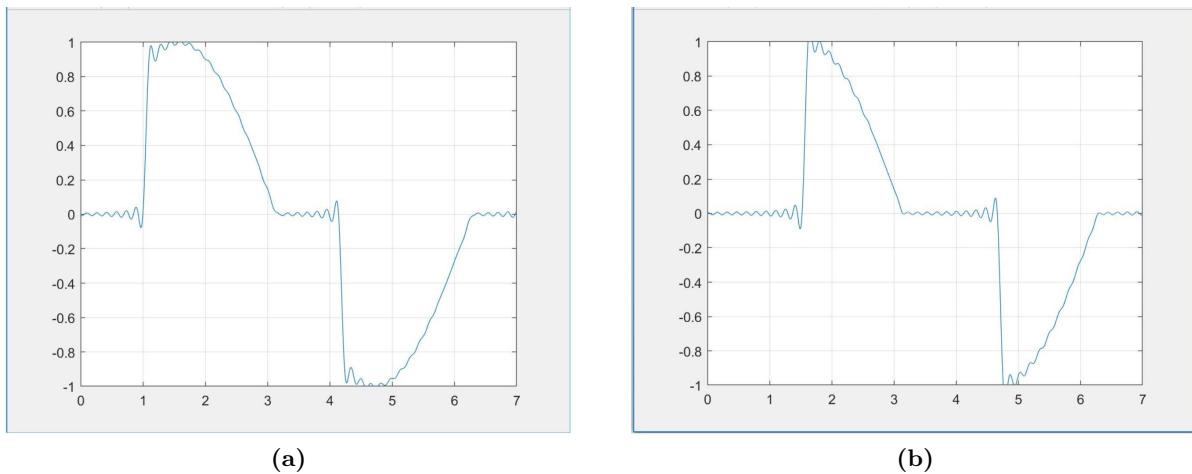


Abbildung 3.3: Rekonstruiertes Signal (a) 60° (b) 90°

Nachdem das Phasenanschnittsignal, das Amplitudenspektrum, das Phasenspektrum und das rekonstruierte Eingangssignal von Hand berechnet und dargestellt wurden, kann man mithilfe der FFT-Funktion (Fast Fourier Transform) von Matlab die Werte aus den Grafiken überprüft. Die folgenden Abbildungen 3.4 beinhalten die Plots mit den beiden Winkeln von 60° 3.4a und 90° 3.4b. Bei dem Amplitudenspektrum ist die x-Achse so normiert, dass die Werte ein Vielfaches der Grundfrequenz von 50 Hz sind. So ist zum Beispiel der Wert bei 500 Hz beim FTT zu vergleichen mit dem Wert 10 bei den von Hand berechneten Spektren. Als Resultat erkennt man, dass beide Methoden die gleichen Ergebnisse herausgeben haben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Überlegung der Berechnungen korrekt waren.

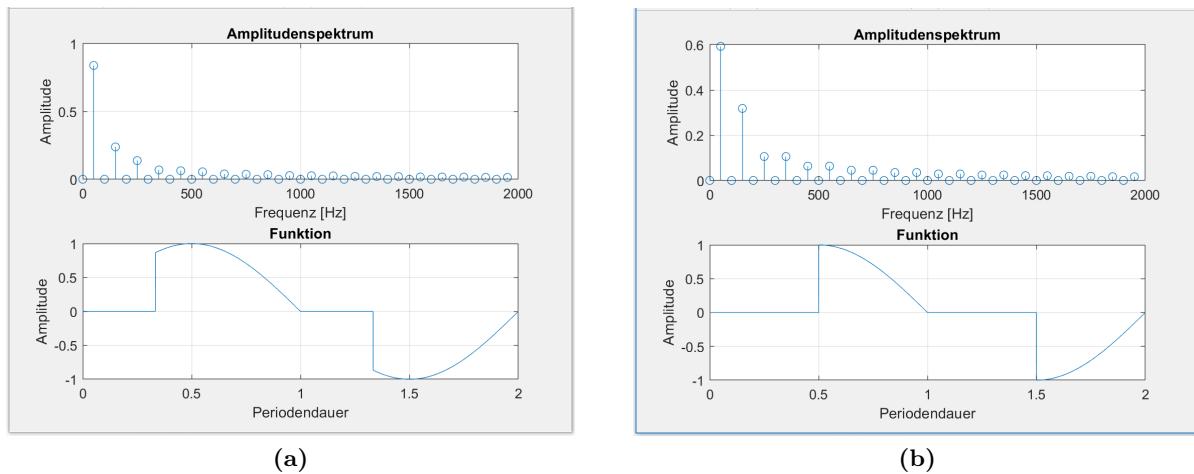


Abbildung 3.4: FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von (a) 60° (b) 90°

3.1.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.5 und 0.8

Bei der zweiten Funktion, die zu überprüfen und simulieren ist, handelt es sich um eine Schwingungspaketsteuerung. Die komplette Paketdauer beträgt bei den abgebildeten Funktionen 20 Halbwellen, ersichtlich in Abbildung 3.5. Verschiedene Einschaltverfahren mit verschiedenen Duty Cyclen, wie zum Beispiel 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 oder 0.8 werden untersucht. In Abbildung 3.5 erkennt man im linken Bild 3.5a einen Duty Cycle von 0.5. Demzufolge sind immer 10 Halbwellen ausgeschaltet und die anderen 10 eingeschaltet. Auf der rechten Seite 3.5b beträgt der Wert des Duty Cycle 0.8. Es sind also zuerst 4 Halbwellen ausgeschaltet und die restlichen 16 Halbwellen werden angesteuert. Die anderen Funktionen mit den dazugehörigen Duty Cyclen sind im Anhang D ersichtlich. Bei beiden Simulationsmethoden sind 5 komplette Schwingungspakete untersucht worden.

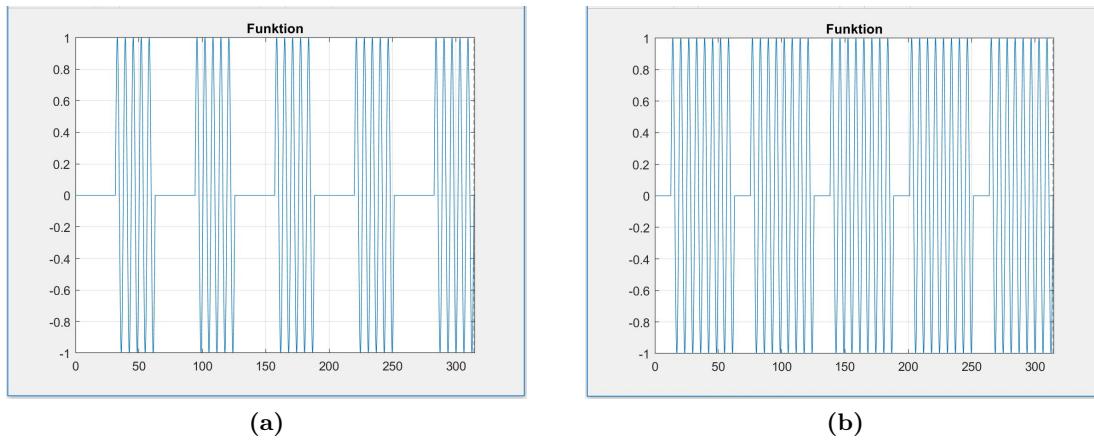


Abbildung 3.5: Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

Um auch hier die Plecs-Simulation zu überprüfen, ist das Amplitudenspektrum absolut linear dargestellt. Bei der folgenden Abbildungen 3.6 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 ersichtlich.

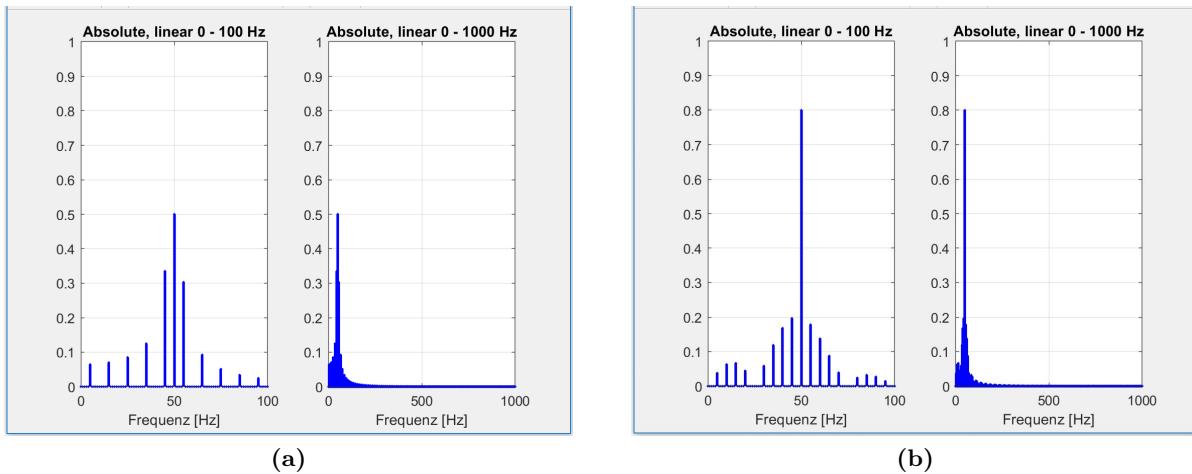


Abbildung 3.6: Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

Damit alle relevanten Oberschwingungen zu erkennen sind, ist das Spektrum bis auf 1000 Hz erweitert worden. Dies ist auf der rechten Seite der jeweiligen Abbildung 3.6 zu sehen. In Abbildung 3.6a wurde das Amplitudenspektrum mit einem Duty Cycle von 0.5 dargestellt und in 3.6b eines mit 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 erklärt sich daraus, dass bei einem grösseren Duty Cycle mehrere Sinusschwingungen vorkommen als bei einem niedrigen.

Die dritte Darstellungsfunktion ist der absolute Logarithmus, ersichtlich in Abbildung 3.7. 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 sind die bereits bekannten Duty Cycle Werte von 0.5 in Abbildung 3.7a und 0.8 in der Abbildung 3.7b verwendet worden, um den absoluten Logarithmus anzuzeigen. Diese Darstellungsform wurde verwendet, damit man einen weiteren Vergleich mit den Plecs-Simulationen erhält.

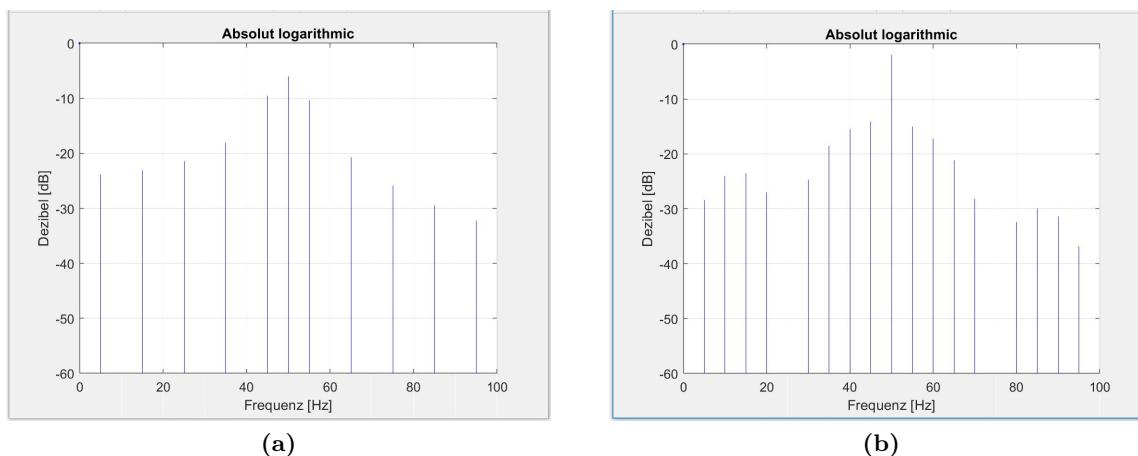


Abbildung 3.7: Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

3.1.3 Sanftes- und Hartes Hoch- und Runterfahren

In den Abbildungen 3.8 und 3.9 simulierte man eine sanfte- und harte Ansteuerung der Leistung. Damit konnte das Verhalten der harmonischen- und zwischenharmonische Oberschwingungen erkannt werden. In der Grafik 3.8 wählte man die Zeit des Hoch-, von 200 ms bis 1200 ms, und Runterfahren, von 1800 ms bis 2800 ms, auf 1000 ms. Diese Ansteuerungsart wird in diesem Beispiel als sanfte Ansteuerung deklariert. Die Zeit des Hoch- und Runterfahren kann theoretisch beliebig gewählt werden. In dem Bild 3.9 wählte man die Zeit des Hoch- und Runterfahren auf 100 ms. Daher bestimmt man dieses Verfahren als harte Ansteuerung. Visuell betrachtet ähnelt das harte Hoch- und Runterfahren viel mehr einem Rechteck als das sanften Verfahren. Daher ist bei dem Amplitudenspektrum eine grösere Streuung der Harmonischen- und Zwischenharmonischen Oberschwingungen erkennbar. Außerdem ist ersichtlich, dass bei der sanften Ansteuerung die Grundschwingung von 50 Hz einen deutlich höheren Peak hat, als der bei der harten Ansteuerung. Je sanfter nun die Last angesteuert wird, desto weniger verteilen sich die beiden Oberschwingungsarten in der Netzrückwirkung.

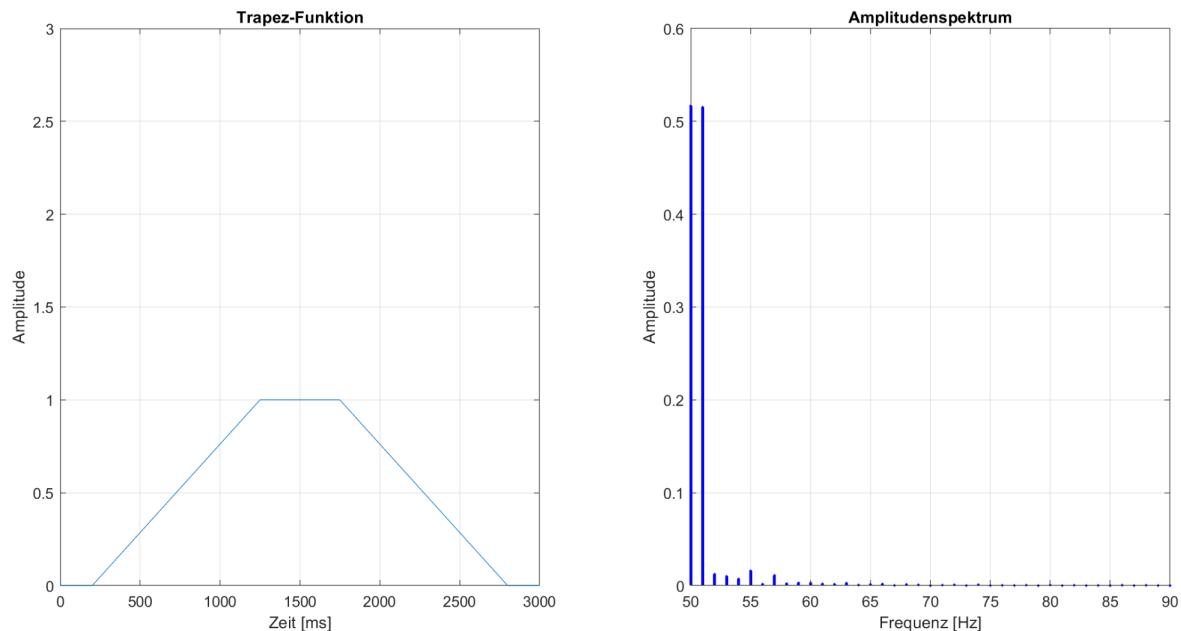


Abbildung 3.8: Sanftes Hoch- und Runterfahren der Leistung

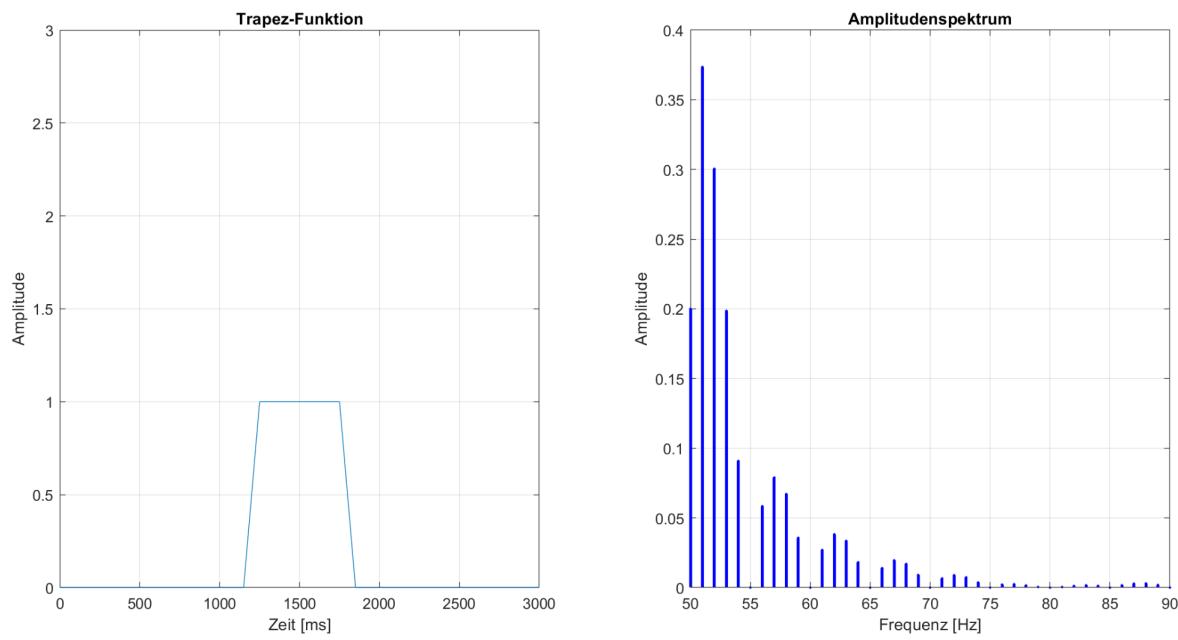


Abbildung 3.9: Hartes Hoch- und Runterfahren der Leistung

3.2 Simulation mit Plecs

Mit dem Simulationsprogramm Plecs sind alle gewünschten Ansteuerungen simuliert worden. Die einphasigen Simulationen der Phasenanschnitt- und der Schwingungspaketsteuerung konnten mit den Matlab-Funktionen verglichen und ausgewertet werden. Basierend auf den verifizierten Werten ist das Verfahren für die dreiphasige Phasenanschnitt- und die Schwingungspaketsteuerung abgeleitet worden. Um von beiden Verfahren die Vorteile zu nutzen, siehe Kapitel 2.7 und 2.8, sind die beiden Ansteuerungsarten kombiniert worden zu einem ein- und dreiphasigen System. Die Resultate sind nachfolgend erläutert.

3.2.1 Einphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Zuerst wird die Phasenanschnittsteuerung mit Plecs simuliert. Wie in Matlab können die verschiedenen Zündwinkel beliebig eingestellt werden. Um die Resultate vergleichen und verifizieren zu können, sind dieselben Winkel wie beim Matlab, siehe Abbildung 3.1 gewählt. In der Abbildung 3.10 erkennt man ein Sinussignal mit einem Phasenanschnitt von 60° , links 3.10a, und einen mit 90° , rechts 3.10b. Die anderen Winkel mit den dazugehörigen Amplitudenspektren sind im Anhang D ersichtlich. Um die Spektren mit den Matlab-Simulationen vergleichen zu können, ist die Amplitude des Sinussignales auch auf ± 1 Volt gestellt worden.

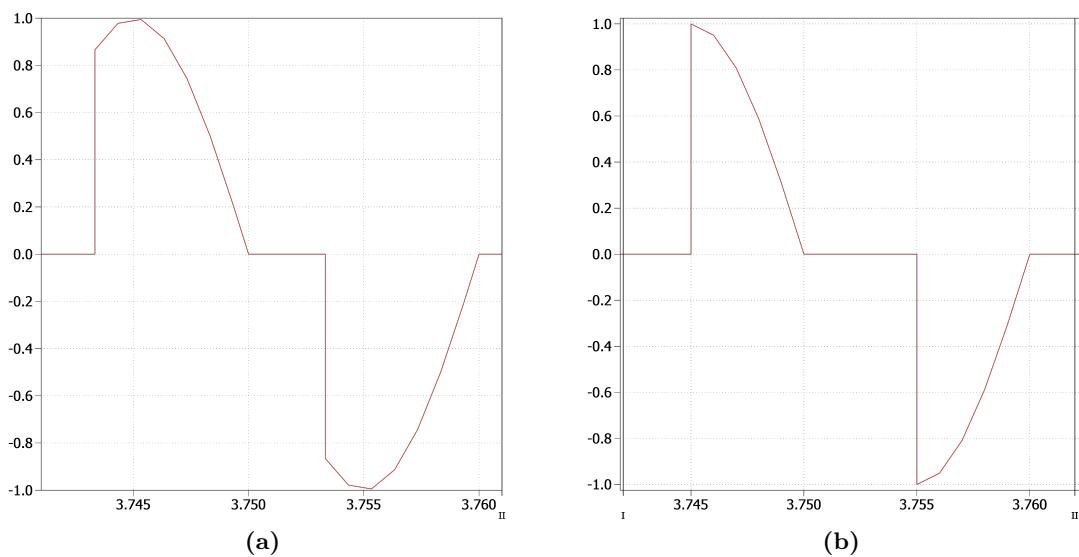


Abbildung 3.10: Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°

Die beiden Diagramme 3.11 zeigen das Amplitudenspektrum der Phasenanschnittsteuerung mit den zwei bereits verwendeten Winkeln. Die Grafik musste nicht wie bei der Matlab-Funktion von Hand berechnet werden, sondern mithilfe des Plecs Scope direkt analysiert werden. Plecs macht auch eine Fourier-Analyse, um das Spektrum anzuzeigen. Vergleicht man die Amplitudenspektren der beiden Simulationen miteinander, sind die vertikalen Verläufe, nach erster Einschätzung, sehr ähnlich. Der genau Vergleich der Werte wird weiter unten analysiert.

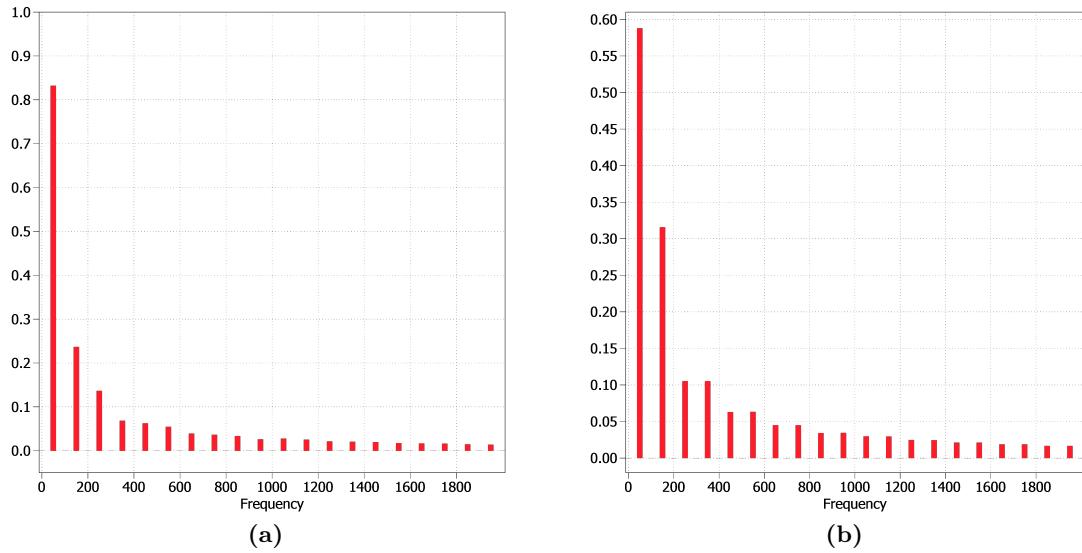


Abbildung 3.11: Amplitudenspektrum (a) 60° (b) 90°

3.2.2 Einphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.5 und 0.8

Als Nächstes wird eine Simulation für die Schwingungspaketsteuerung aufgebaut 3.12. Auch hier ist je ein Duty Cycle von 0.5 ersichtlich auf der Abbildung 3.12a, beziehungsweise 0.8 auf der Abbildung 3.12b verwendet worden, damit man die Resultate wieder mit der Matlab-Funktion vergleichen kann. Andere Duty Cycle sind im Anhang D ersichtlich.

In der Abbildung 3.13 ist das Amplitudenspektrum des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung 3.13a 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 Abbildung 3.13b erweiterte man das Spektrum bis zu 1000 Hz. Auch hier ist eine optische Ähnlichkeit zur Matlab-Funktion ersichtlich.

Vollständigkeitshalber ist das Gleiche noch mit einem Duty Cycle von 0.8 realisiert. Auch hier ist das Spektrum, in der linken Abbildung 3.14a mit einer Frequenz von 0 Hz - 100 Hz und im rechten Bild 3.14b bis 1000 Hz, dargestellt.

Zum Schluss ist das lineare absolute Spektrum der beiden Duty Cyclen, 0.5 in Abbildung 3.15a und 0.8 in Abbildung 3.15b, veranschaulicht. Damit man die Grafiken mit der Matlab-Simulation vergleichen kann, wird das Spektrum bis zu einer Frequenz von 100 Hz angezeigt. Auch hier erkennt man eine optische Ähnlichkeit zur Matlab-Simulation.

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

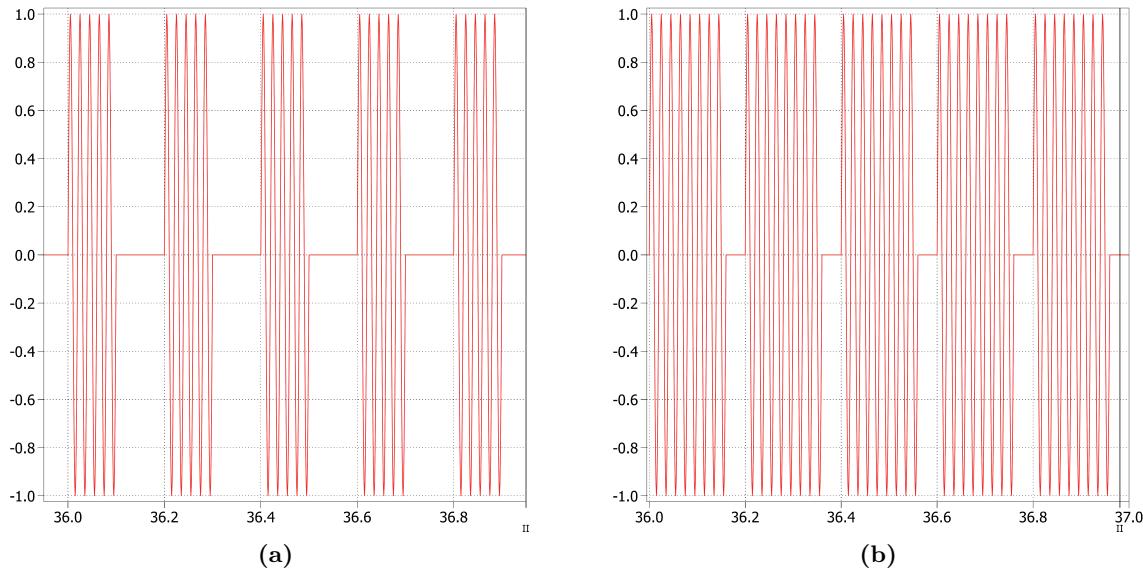


Abbildung 3.12: Schwingungspaket mit einem Duty Cycle (a) 0.5 (b) 0.8

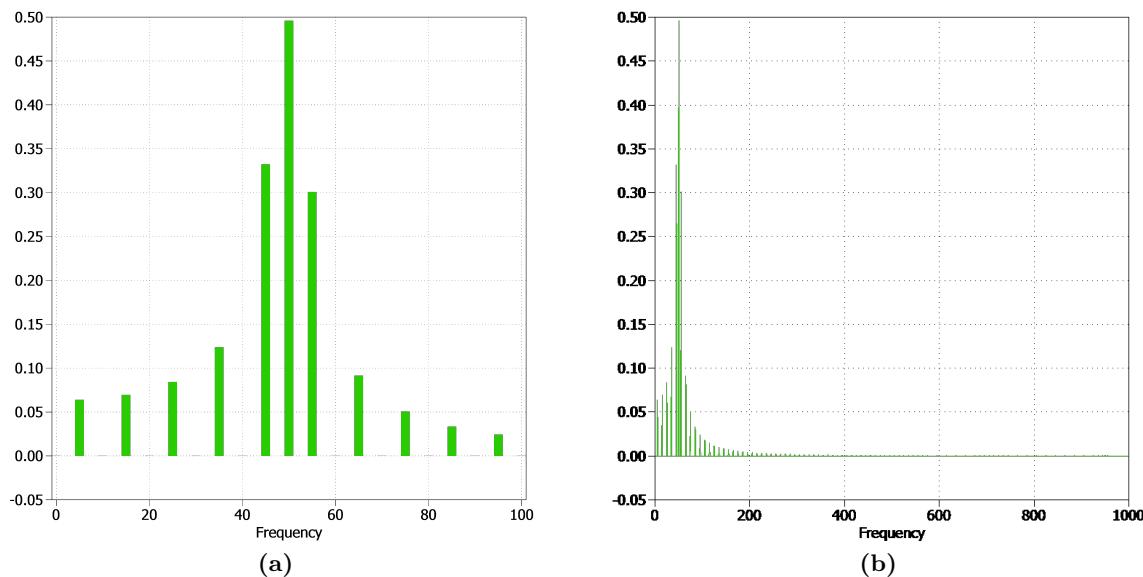


Abbildung 3.13: Amplitudenspektrum mit einem Duty Cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz

Simulationen nummerisch und visuell miteinander verglichen. Man erkannte, dass die meisten gegenübergestellten Werte eine Abweichung von unter 1% haben. Dies Abweichung entsteht, da man die Auflösung der Plecs-Simulation bewusst niedriger eingestellt hat, um die Darstellungszeit der Funktion zu verkürzen. Diese Abweichung konnte somit der Auflösung zugeschrieben werden. Die Resultaten sind gleichwohl für den Vergleich mit den Matlabwerten brauchbar. In der Abbildung 3.16 ist der Vergleich des Amplitudenspektrums mit einem Phasenanschnittswinkel von 90° ersichtlich. Die anderen Aufnahmen sind optisch und nummerisch im Anhang dargestellt.

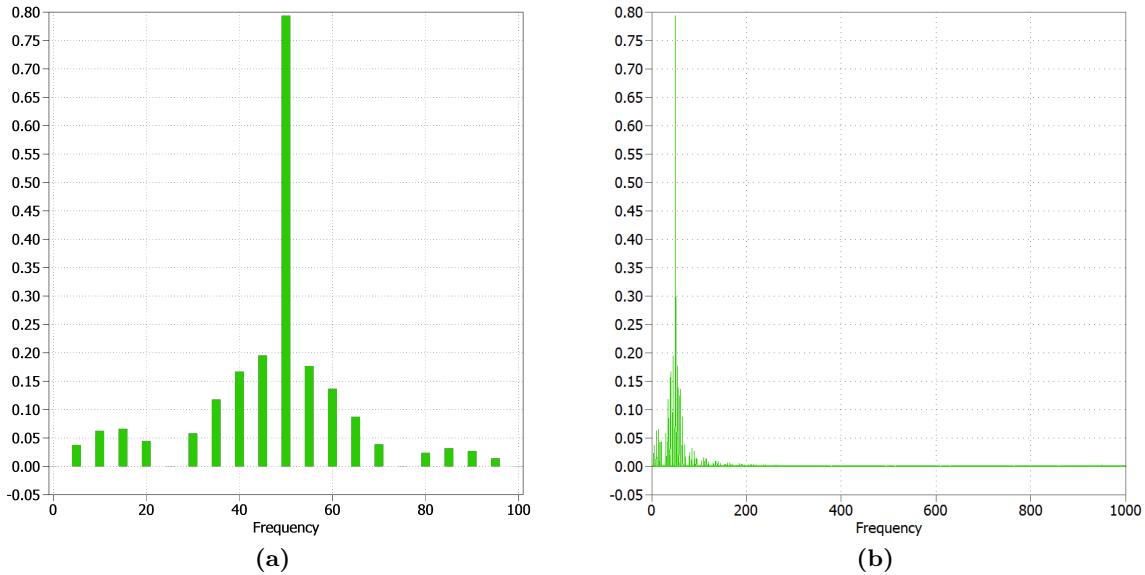


Abbildung 3.14: Amplitudenspektrum mit einem Duty Cycle 0.8 von (a) 0 Hz - 100 Hz (b) 0 Hz - 1000 Hz

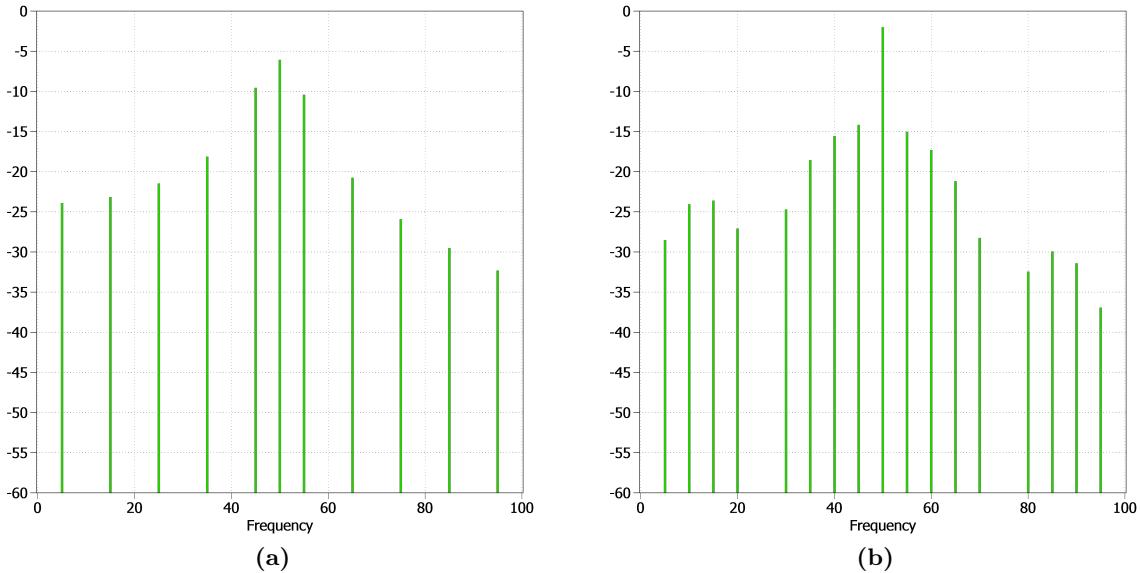


Abbildung 3.15: Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8

3.2.4 Dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° und 90°

Folgende Abbildungen 3.17 und 3.18 beinhalten die Simulation der dreiphasigen Phasenanschnittsteuerung, mit den bekannten Winkel von 60° und 90° . In den Abbildungen 3.17a und 3.18a ist im unteren Bereich das Eingangssignal mit der verketteten Nennspannung von 230 V dargestellt. Die oberen Spannungsverläufe 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 $150\ \Omega$ ein, da der Culatti im Messaufbau den gleichen Wert hat.

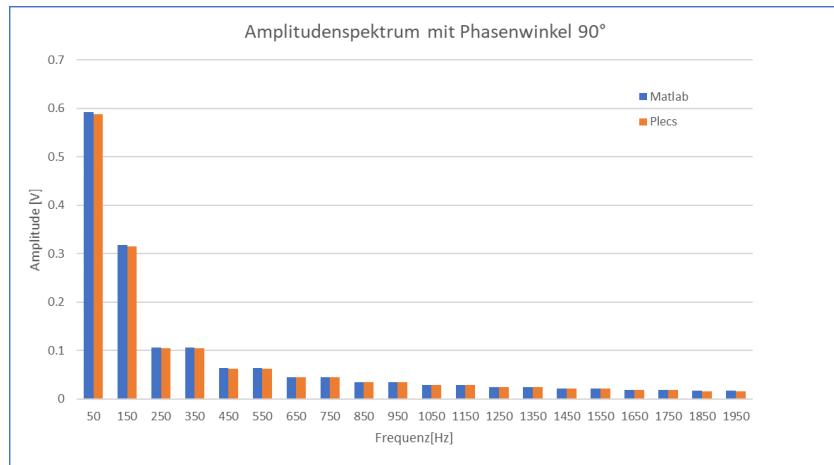


Abbildung 3.16: Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel 90°

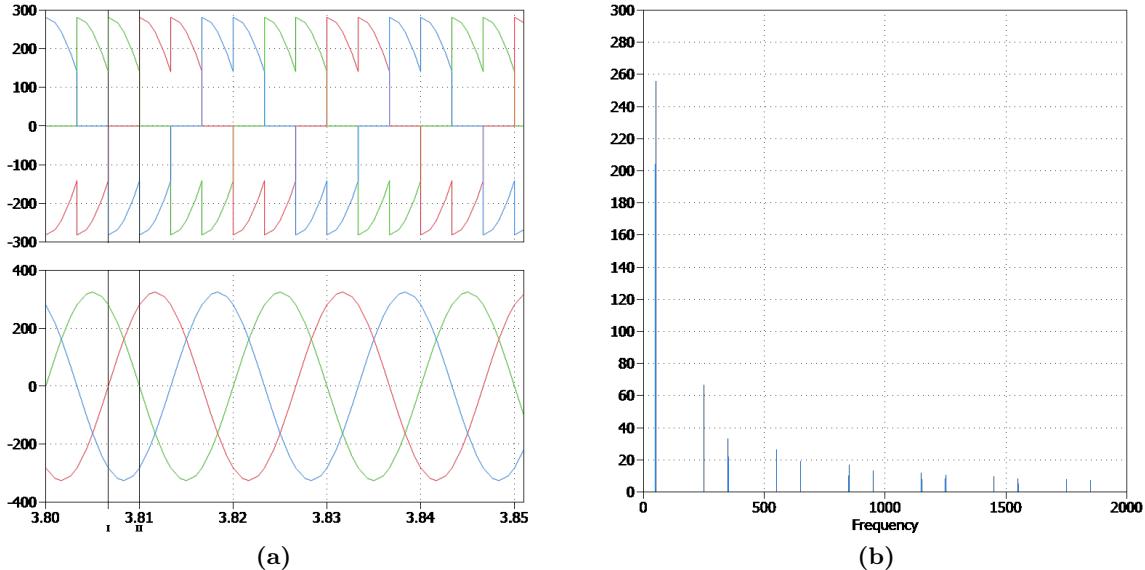


Abbildung 3.17: dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60°(a) Signal (b) FFT

Anhand von Cursor 1 erkennt man, dass zuerst eine positive Halbwelle der Eingangsspannung, des ersten Phase (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 ist, tritt eine negative Spannung über dem Thyristor des zweiten Triac auf (rot). Beim Cursor 2 hat es eine negative Eingangsspannung der zweiten Phase (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 um eine ohmsche Last handelt, verhält sich das Stromsignal phasengleich wie die Spannungskurve.

Auf der Abbildung 3.17b und 3.18b 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.

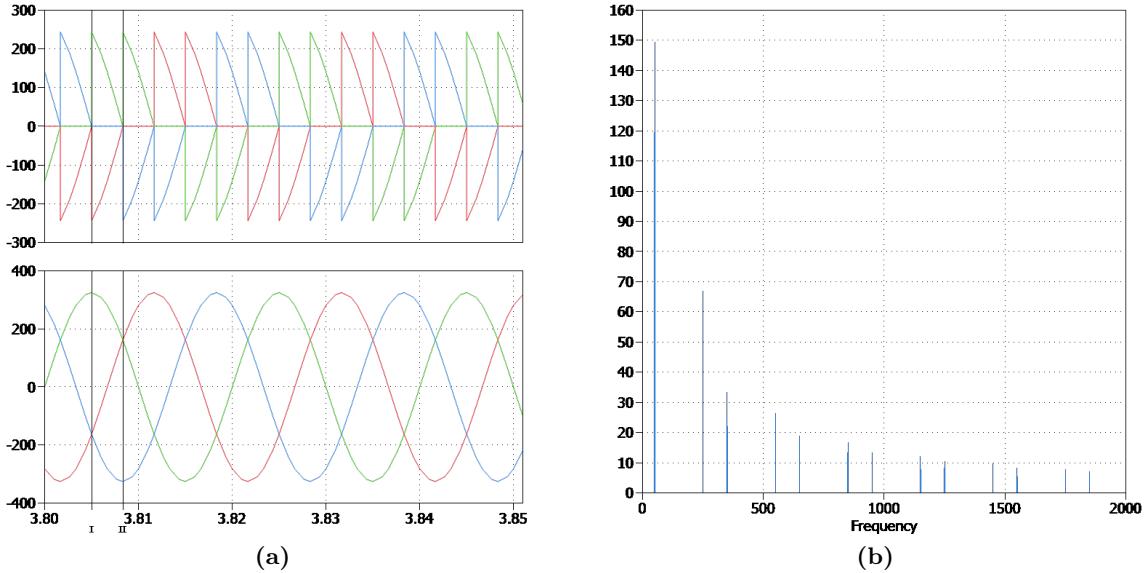


Abbildung 3.18: dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 90° (a) Signal (b) FFT

3.2.5 Dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycles von 0.5 und 0.8

Nachfolgend sind die dreiphasigen Schwingungspaketsteuerungen mit den Duty Cycle von 0.5 in Abbildung 3.19a und 0.8 in Abbildung 3.20a 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 Signalen, handelt es sich um die Spannungspakete über den einzelnen Widerständen. In den Bildern 3.19b und 3.20b 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.

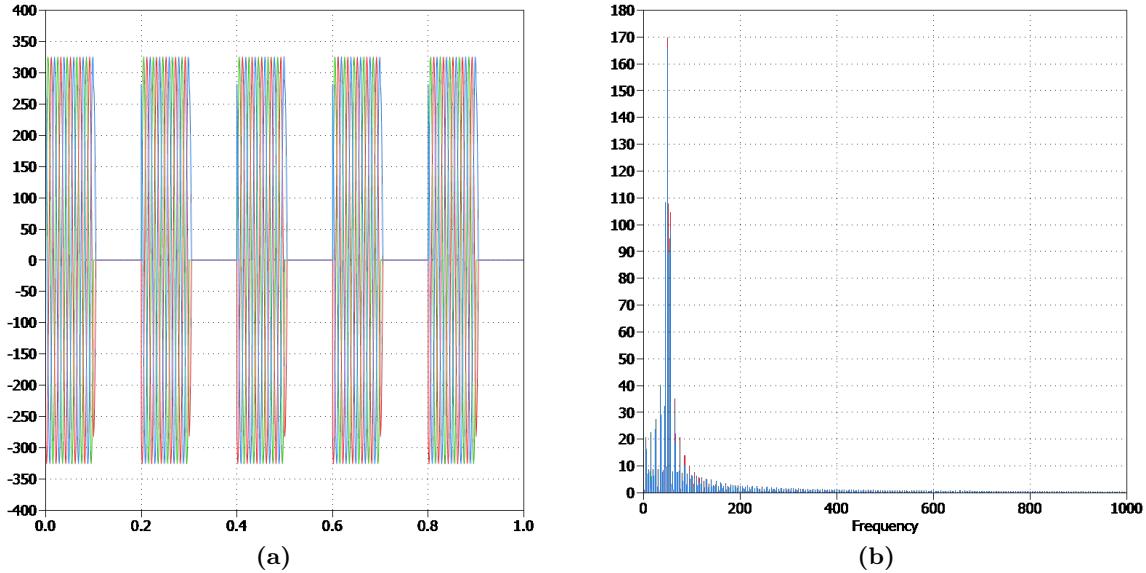


Abbildung 3.19: dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.5 (a) Signal (b) FFT

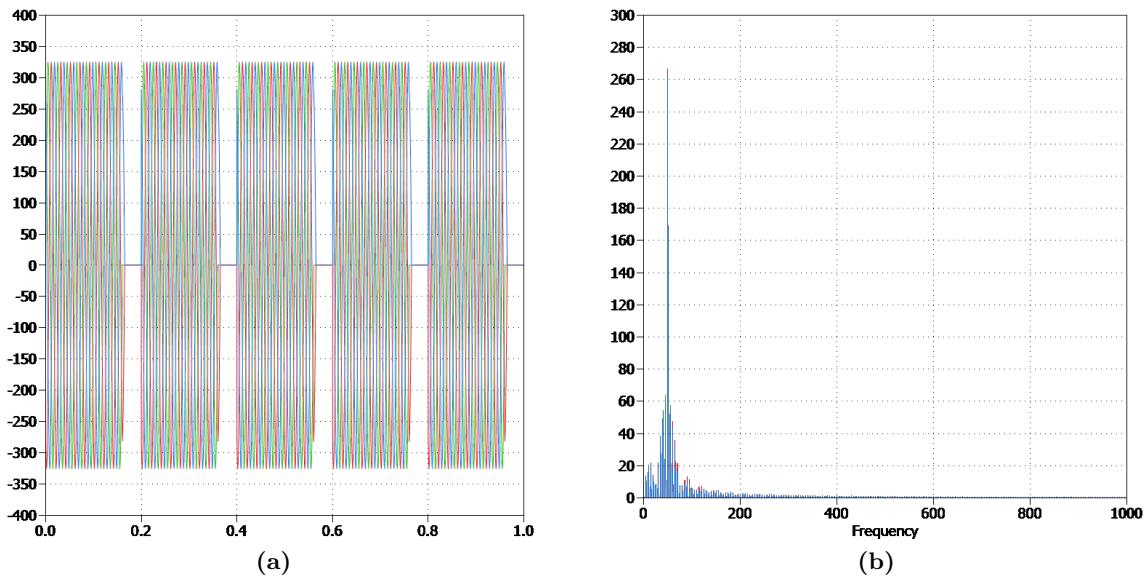


Abbildung 3.20: dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.8 (a) Signal (b) FFT

3.2.6 Einphasige Kombination des Auf- und Absteuern

Nach den Simulationen der beiden Steuerungsverfahren im ein- und dreiphasigen System, wird die Kombination der beiden Verfahren entwickelt. In der Abbildung 3.21b erkennt man ein sanftes Ansteigen der Spannung bis auf die volle Leistung und nach einiger Zeit wieder ein sanftes Herunterfahren der Spannung bis sie null beträgt. In Abbildung 3.21a ist der Duty Cycle auf 0.5 eingestellt. Die einzelnen Pakete verhalten sich nun so wie das sanfte Hoch- und Runterfahren der Spannung, erkennbar in Abbildung 3.21b. Vergleicht man das FFT in Abbildung 3.22a mit dem FFT des Schwingungspaketes mit hartem Zu- und Wegschalten 3.13b ist eine Verringerung

der subharmonischen Schwingungen ersichtlich. Das sanfe Hinauf- und Hinunterfahren hat aber zufolge, dass die Oberwellen bei den Harmonischen zunehmen.

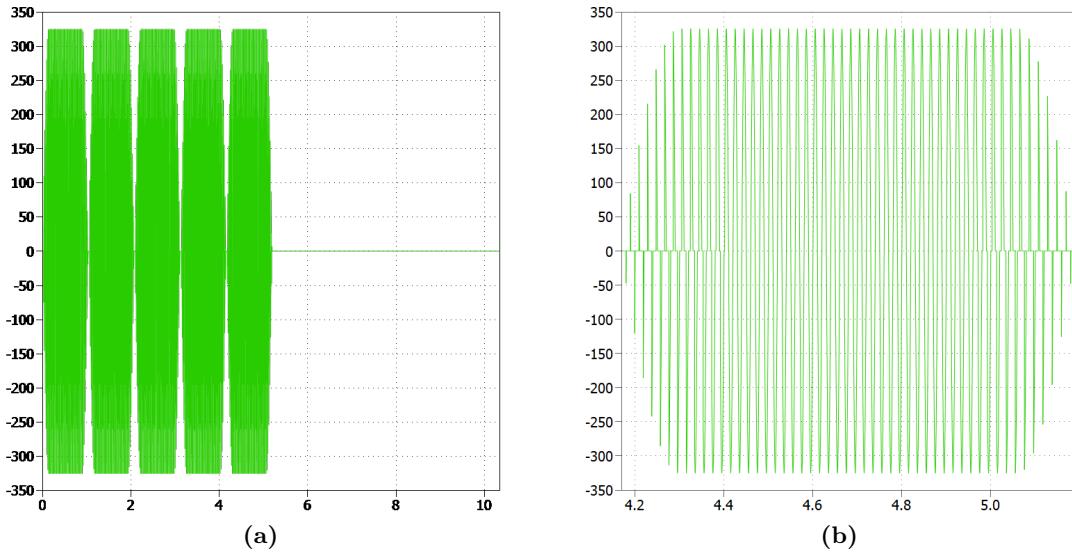


Abbildung 3.21: Einphasiges Hoch- und Runterfahren mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt eines Paketes

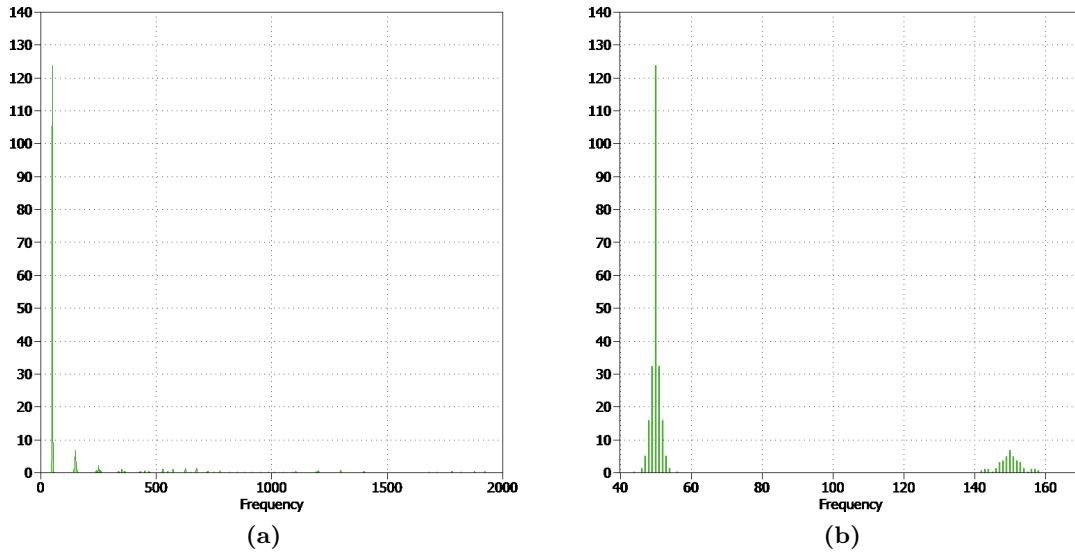


Abbildung 3.22: FTT des einphasigen Hoch- und Runterfahrens mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 40 Hz - 170 Hz

3.2.7 Dreiphasige Kombination des sanften Auf- und Absteuern

Die Abbildung 3.23 zeigt eine dreiphasige Steuerung des Hoch- und Runterfahrens. Das dargestellte Spannungssignal hat einen Duty Cycle von 0.5, ersichtlich in Abbildung 3.23a. Die Kurve und die Funktion der Spannung verhält sich ähnlich wie die Kombination des einphasigen Hoch- und Runterfahrens. 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 in Abbildung 3.24 von 0 Hz - 2000 Hz erkennt man den grössten Peak bei der Grundschwingung von 50 Hz. Die sub- und zwischenharmonischen Schwingungen fallen bei der sanften Auf- und Absteuerung viel mehr ins Gewicht als die Harmonischen. Sie sind nur noch minimal vorhanden.

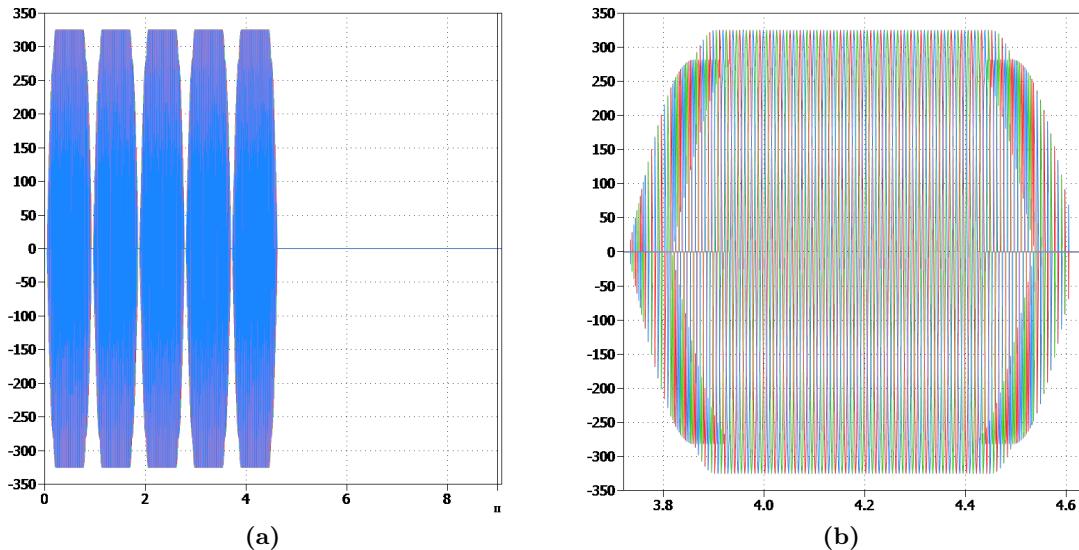


Abbildung 3.23: Dreiphasiges Auf- und Absteuern mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt

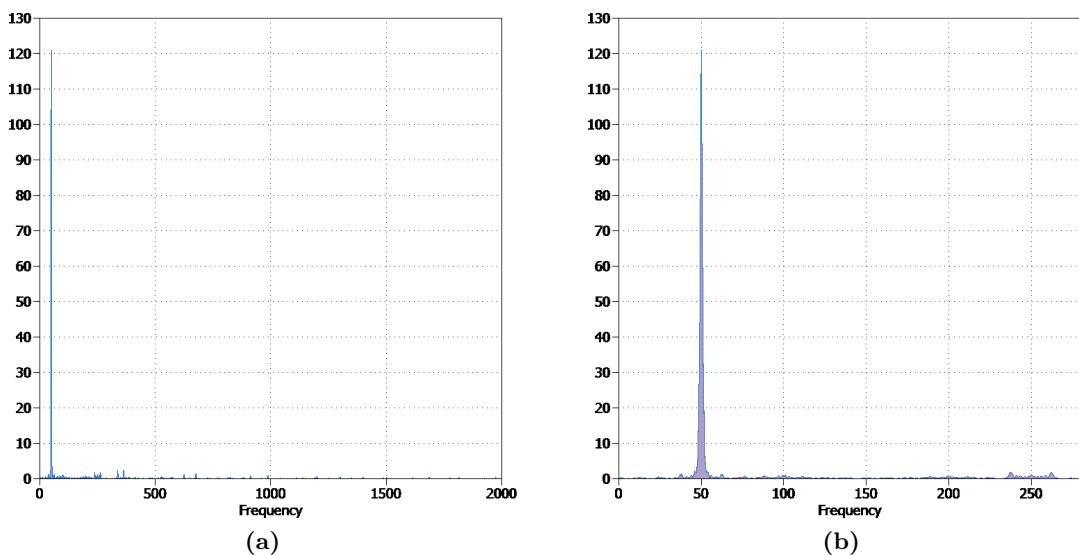


Abbildung 3.24: FTT des dreiphasigen Hoch- und Runterfahrens mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz - 300 Hz

3.2.8 Alternative Ansteuerungen

In der Praxis kommen zum Teil die sogenannten Sparsteuerungen zum Einsatz. Bei dieser Steuerungsart werden nicht alle drei Phasen angesteuert, sondern nur eine oder zwei. Damit man ein solches Verfahren erhält, überbrückt man die Thyristoren in der gewünschten Phase. Eine weitere Möglichkeit ist, die Thyristoren gar nicht erst in die Schaltung einzubinden. Man kann sie deshalb kurzerhand weglassen. Die überbrückte Phase dient dabei als Ausgleichs- und Rückleiter. Mit Plecs wurden solche Verfahren simuliert, wobei die Last in Stern oder Dreieck geschaltet ist. Die Ansteuerungen der nicht veränderten Phasen, verhält sich gleich wie die der dreiphasigen Kombinationssteuerung. Das folgende Kapitel 3.2.8 zeigt die Simulation einer zwei Phasen Ansteuerung, bei der die Last in Stern geschaltet ist.

Andere
Steuerungs-
arten sind
digital er-
sichtlich.

Zwei Phasen Ansteuerung mit Last in Stern

Bei der Abbildung 3.25 erkennt man eine zweiphasige Ansteuerungsart, bei der die dritte Phase (blau) überbrückt wurde. Es sind wiederum fünf Schwingungspakete Ein- und Ausgeschaltet, was einem Duty Cycle von 0.5 entspricht. In Abbildung 3.25b ist eines der fünf Schwingungspaketen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Spannung welcher über die Thyristoren anfallen, immer direkt über die überbrückte Phase abfällt. Daher sind am Anfang und Ende die blauen Spannungsspeaks ersichtlich. Sobald jedoch die volle Spannung bezogen wird, verhält sich dieses Verfahren wie die dreiphasige Kombination der Sanften-Ansteuerung. Alle Thyristoren haben daher einen Zündwinkel von 0° und das System verhält sich symmetrisch.

In der Abbildung 3.26 ist das FFT der zwei Phasen Ansteuerung, wiederum von 0 Hz bis 2000 Hz auf der linken Seite und 0 Hz bis 280 Hz auf der rechten Seite, dargestellt. Vergleicht man dies, mit dem der dreiphasigen Kombination, erkennt man, dass die Ausbreitung der Oberschwingungen bei diesem Verfahren viel grösser sind. Außerdem ist bei 150 Hz, der dritte Harmonische, ein Spannungsspeak erkennbar. Dieser kommt davon, dass eine Asymmetrie zwischen den drei Phasen herrscht, da die dritte Phase nicht angesteuert wird.

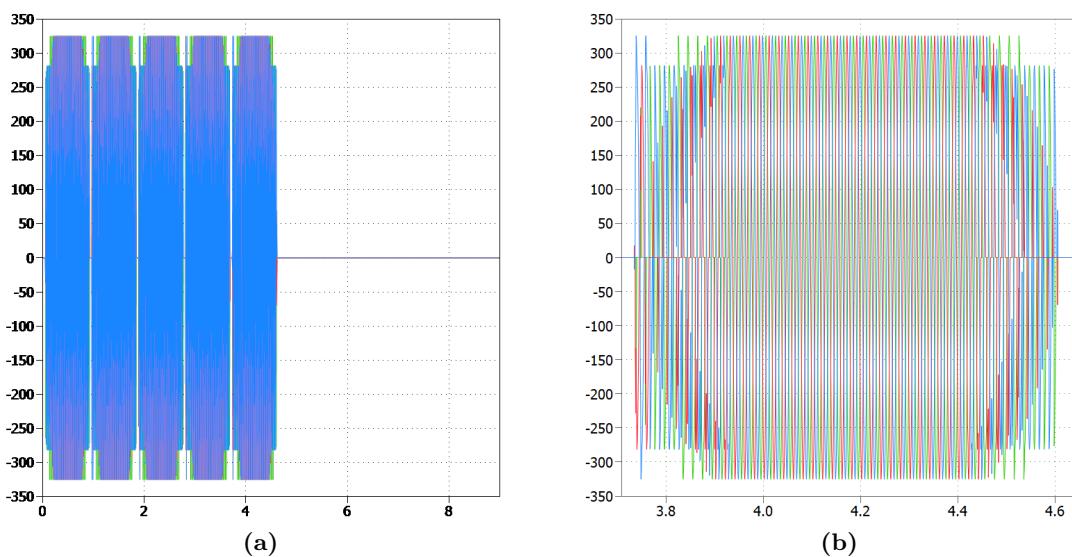


Abbildung 3.25: Zweiphasige Ansteuerung mit Last in Stern (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt

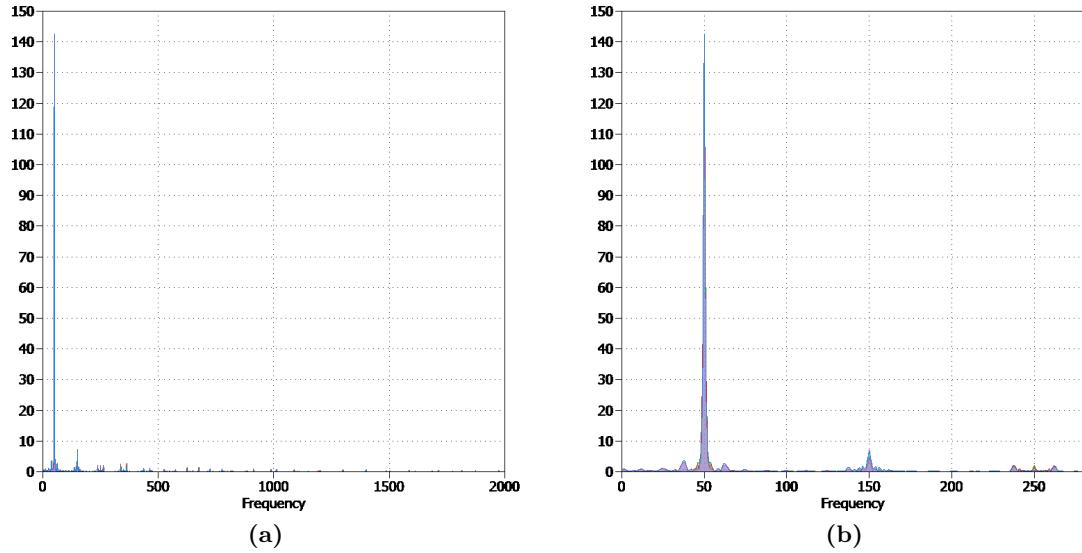


Abbildung 3.26: FTT der zweiphasigen Ansteuerung (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz -280 Hz

Halbwellensteuerung

Eine weitere Möglichkeit, die Thyristoren anzusteuern ist die Halbwellensteuerung. Dabei wird die positive Halbwelle einer Phase 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 Simu-
lation

4 Messaufbau

Damit die verschiedenen simulierten Ansteuerungsarten in die Praxis umsetzen, wurde ein Messaufbau aufgebaut. In diesem Kapitel sind alle Komponenten, welche für den Messaufbau benötigt wurden, aufgeführt. Dazu gehören die Spannungsverstärkerschaltung, welcher sich auf dem Arduino befindet, das eingebaute Filter sowie der Arduino selber, der für die verschiedenen Funktionen programmiert wurde.

4.1 Laboraufbau

Die Praxistests wurden mit einem “T-Drive 3Ph compact Thyristorsteller“ von der Firma Chemtronic durchgeführt. Wie der Name des Produktes sagt, arbeitet dieser Thyristorschaltung mit drei 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 für die Ansteuerung auch ein Spannungssignal von 0 V - 10 V benutzt werden. Dieses Spannungssignal entspricht linear dem Zündwinkel 180° bis 0° der Thyristoren. Um dieses Spannungssignal erzeugen zu können, wurde ein Arduino Mega 2560 verwendet. Er erzeugt jedoch nur eine Ausgangsspannung von 5 V. Deshalb wurde eine Spannungsverstärkungsschaltung entworfen, die die Spannung verdoppelt. Die PWM-Funktion im Arduino konnte genutzt werden, damit die Spannung variabel bleibt. Das PWM-Signal läuft mit einer Frequenz von 490 Hz [9]. Damit der Operationsverstärker der Verstärkungsschaltung die Spannung richtig verstärkt, muss zwingend ein reines DC-Signal am Eingang des Operationsverstärkers anliegen. Deshalb wurde zusätzlich ein Tiefpass-Filter erster Ordnung am Ausgang des Arduinos eingebaut, mit einer Grenzfrequenz von 1 Hz.

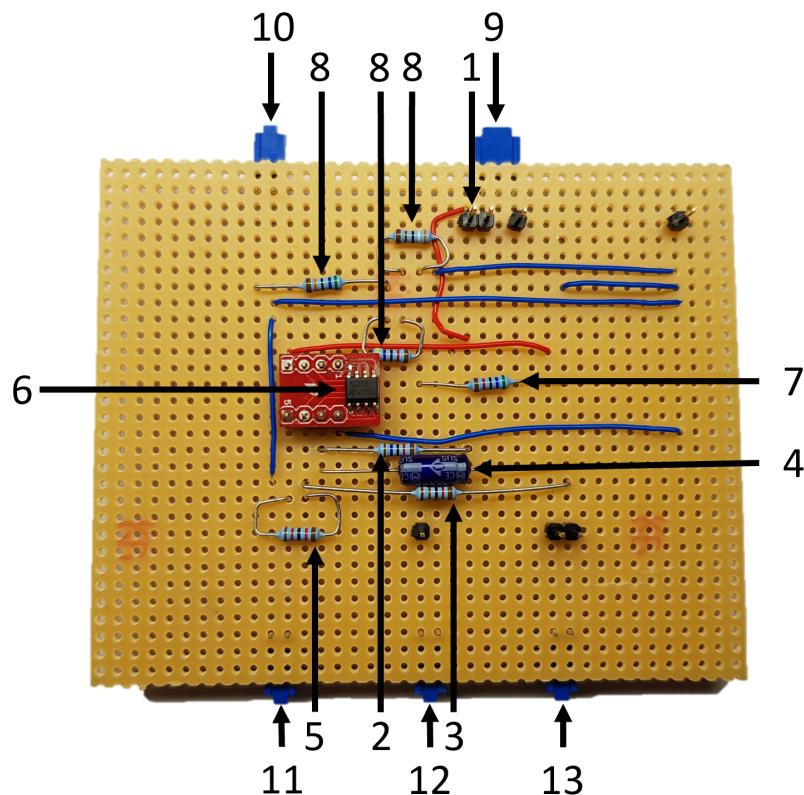


Abbildung 4.1: Laboraufbau mit Verstärkerschaltung und Spannungsteiler

Nummer	Bauteil
1	PWM-Ausgang Arduino
2	R1 des Filters
3	R2 der Spannungsverstärkungsschaltung
4	C1 des Filters
5	R3 der Spannungsverstärkungsschaltung
6	Operationsverstärker TS912
7	R4 des Spannungsteilers
8	R5 des Spannungsteilers (3 Widerstände seriell)
9	Freigabe Arduino
10	Eingang Spannungsmessung
11	Ausgang Steuerspannung
12	Abgriff Spannungsteiler
13	Speisespannung Arduino & Spannungsverstärker

Tabelle 4.1: Beschreibung der Nummern

Filter

Berechnet wurden die passiven Elemente des Tiefpassfilters mit folgender Grundformel [10]:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.1)$$

Um die Kapazität des Kondensators oder den Widerstand zu bestimmen, wurde die Grenzfrequenz auf $f = 1 \text{ Hz}$ gesetzt. Ausserdem wählte man die Kapazität auf $10 \mu\text{F}$. Dies ergab einen Widerstand von 16Ω .

Verstärkerschaltung

Die Verstärkung einer nicht invertierenden Verstärkungsschaltung wird wie folgt berechnet [11]:

$$V_u = 1 + \frac{R_3}{R_2} \quad (4.2)$$

Um die Ströme klein zu halten, wurden Widerstände von $12 \text{ k}\Omega$ verwendet. Die Verstärkung muss den Faktor zwei haben, damit die Spannung verdoppelt wird. Daher wurden die beiden Widerstände gleich gross gewählt.

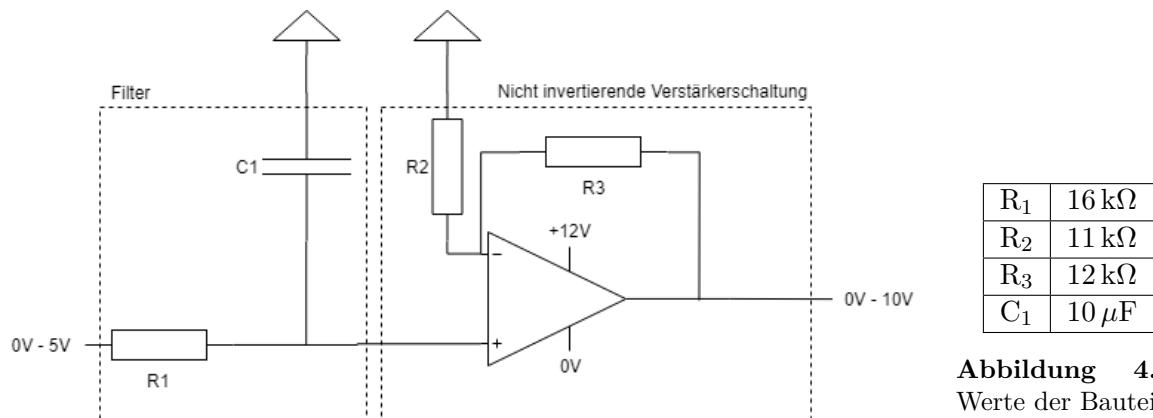


Abbildung 4.3:
Werte der Bauteile

Abbildung 4.2: Schema Verstärkerschaltung

Bei der Verstärkerschaltung wurde die Ausgangsspannung mit einem Duty Cycle von 1 gemessen, welches in einer Spannung von 9.885 V resultierte. Dies bedeutet, dass der Thyristorsteller nicht voll ausgesteuert wird. Damit man die vollen 10 V erhält, wurde bei der Verstärkerschaltung die Verstärkung erhöht. Mit der Formel 4.2 konnte sie neu berechnet werden:

$$V_u = 1 + \frac{12k\Omega}{11k\Omega} = 2.09 \quad (4.3)$$

Mit dem neuen Widerstand R_2 , wurde am Ausgang eine Spannung von 10.2 V gemessen. Somit kann der gesamte Bereich von 0 V - 10 V benutzt werden um den Thyristorsteller anzusteuern.

4.2 Laboraufbau mit einem Widerstand

Nach dem Verifizieren der Funktionalität der Spannungsverstärkungsschaltung, konnte mit dem eigentlichen Laboraufbau begonnen werden. Hierbei wurde ein variabler-, dreiphasiger Culatti-Widerstand als Last benutzt. Dieser hat den Vorteil, dass die Last bei allen Phasen symmetrisch sind. Um den Strom klein zu halten, wurde ein Widerstand von 150Ω gewählt. Der Aufbau der Messschaltung ist auf der Abbildung 4.4 ersichtlich.

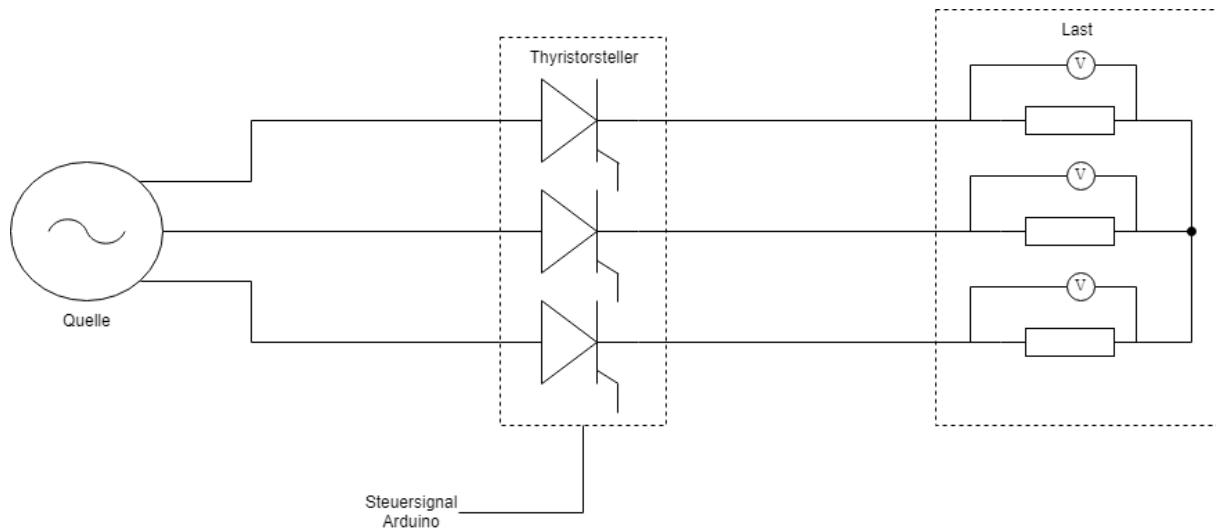


Abbildung 4.4: Schema Laboraufbau mit einem dreiphasigen Widerstand in Stern geschaltet

Die Last wurde zudem in Dreieck geschaltet, um einen Unterschied von den Strömen und den Spannungen zur Sternschaltung zu erhalten.

4.3 Laboraufbau mit einer ASM

Gleich wie beim Laboraufbau des Widerstands wurde bei den Messungen eine Asynchronmaschine als Last in den Stromkreis eingebaut. Die Maschine verhält sich nicht wie der Culatti rein ohmsch, sondern ohmsch-induktiv da verschiedene Reaktanzen in der Erreger- und Ankerwicklung vorkommen. Daher werden die Spannungen und die Ströme der Maschine anders aussehen als beim Widerstand. Dabei wurde er in Stern und in Dreieck geschaltet. Ein Vorteil der Maschine, der Marke Lukas Nülle mit einer Leistung von 0.3 kW ist, dass ein integrierter Drehzahlgeber vorhanden ist, um die Drehzahl zu messen. Ein weiterer interessanter Punkt ist, dass beim Wegschalten der Spannung der Motor weiter dreht und so träge auf Veränderungen reagiert.

4.4 Arduino

Als Arduino, welcher den Thyristorsteller ansteuert, wurde ein Arduino Mega2560 verwendet. Dabei wurde der Code mit der Arduinosoftware geschrieben. Mit den verschiedenen I/O Pins können Spannungen bis zu 5 V gemessen und ausgegeben werden.

Phasenanschnittssteuerung mit Arduino

Die Phasenanschnittsteuerung wird mit der einfachen 0 V - 10 V-Ansteuerung des Thyristorstellers realisiert. Dabei ist die Ansteuerungskennlinie linear und so entsprechen 10 V einem Zündwinkel von 0° und 0 V einem Zündwinkel von 180°. Dieser Ansteuerungsbereich muss auf die 0 bis 255 Werte umgerechnet werden, da der analogWrite()-Bereich des Arduinos so konzipiert ist. Wenn zum Beispiel ein Winkel von 90° erwünscht ist, muss ein Wert von 127 ausgegeben werden.

Schwingungspaketsteuerung mit Arduino

Die Schwingungspaketsteuerung funktioniert mit dem Thyristorsteller nicht so einfach, da dieser nur für den Phasenanschnitt konzipiert ist. Jedoch kann beim Arduino zwischen HIGH und LOW mit einer bestimmten Zeitverzögerung dazwischen umgeschaltet werden. Das Problem, welches dabei auftritt ist, dass der Thyristorsteller und die Spannungsverstärkerschaltung zusammen eine Zeitverzögerung von 0.2 s haben. So schaltet der Sinus verzögert ein und daraus folgt ein sanftes Hochfahren von 0.35 s. Ein hartes Zu- und Wegschalten, wie in den Simulationen gezeigt, ist deshalb nicht möglich.

Hartes Auf- und Absteuern

Um das harte Auf- und Absteuern zu implementieren, wurden die beiden vorherigen Verfahren miteinander kombiniert. Dies hat den Grund, dass die Nachteile der beiden vorherigen Verfahren minimiert werden. Anstatt jedoch nur einen Winkel vorzugeben, wurde mit einer for-Schleife die Ansteuerungsspannung und somit der Zündwinkel linear erhöht. Sobald sich die Spannung auf dem Maximum befindet, wartet der Thyristorsteller für 0.2 s. In dieser Zeit wird die maximale Spannung ausgegeben. Danach wird mit einer zweiten for-Schleife heruntergefahren. Wenn die minimale Spannung erreicht ist, wartet das Programm 0.1 s, bis das nächste Hochfahren beginnt. Dies dient dazu, dass das sonst Spannungssignal nicht auf 0 V geht. Die zwei for-Schleifen befindet sich in einer dritten for-Schleife, die die Schwingungspaketsteuerung simuliert. Mit ihr kann eingestellt werden, wie oft das Hoch- und Runterfahren durchgeführt wird. Wenn zum Beispiel fünf von zehn Pakete angesteuert werden, fährt das Programm fünfmal hoch- und runter und sperrt die restlichen fünf Pakete. Wie dieser Code aussieht, ist auf der Abbildung 4.5.

```

for (int z = 0; z < 10; z++) {
    if (z < anzahl_Schwingungspakete) {
        for (int i = 0; i < 255; i++) {
            analogWrite(Controll_P, i);
            delay(Geschwindigkeit);
        }
        delay(200);
        for (int i = 255; i > 0; i--) {
            analogWrite(Controll_P, i);
            delay(Geschwindigkeit);
        }
        delay(100);
    } else {
        digitalWrite(Controll_P, LOW); // Ausschalten fuer Schwingungspakete keine Leistung
        delay((10 - anzahl_Schwingungspakete) * 480); // Verzoegerung bis wieder eingeschaltet werden soll
    }
}

```

Abbildung 4.5: Hartes Auf- und Absteuern Arduinocode

Sanftes Auf- und Absteuern

Bei dem sanften Auf- und Absteuern ist die Steigung des Hoch- und Runterfahrens flacher als die bei dem harten Auf- und Absteuern. Wenn langsamer Hoch- und Runterfahren wird, sinken die Werte der harmonischen Oberwellen. Zusätzlich wird nach dem Erreichen der maximalen Spannung eine Verzögerung von 6 s eingebaut damit das Signal 6 s auf dem Maximum bleibt. Anschliessend fährt das Programm die Spannung mit der gleichen Steigung wie beim Hochfahren runter und bleibt für 3 s auf 0 V. Dies kann beliebig oft wiederholt werden.

4.4.1 Drehzahlmessung für eine Reglerauslegung

Um die Drehzahl des Asynchronmotors messen und regeln zu können, wurde eine Drehzahlregelung im Arduino programmiert. Dabei wird die Spannung über dem Drehzahlgeber des Asynchronmotors benötigt. Sie beträgt bei der maximalen Drehzahl von 2800 U/min 58.8 V. Die Spannung ist linear von der Drehzahl abhängig und beträgt so, bei zum Beispiel 1400 U/min 29.4 V. Da der Arduino nur eine maximale Spannung von 5 V einlesen kann, wird mithilfe eines Spannungsteilers die Spannung des Drehzahlgebers linear reduziert. Mit der Grundformel des Spannungsteilers 4.4 und des freien Wählens eines Widerstandes R_5 konnte daraus R_5 bestimmt werden [12]:

$$U_2 = U_{Ges} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_5} \Rightarrow 4.94V = 58.8V \cdot \frac{56k\Omega}{56k\Omega + R_5} \quad (4.4)$$

Das Resultat des Widerstands R_5 ist 611 kΩ und somit konnte die Spannung mit dem Arduino gemessen werden. Mit dem ADC wird sie in 1024 verschiedenen Werte aufgeteilt. Der Wert 512 entspricht einer Spannung von 2.5 V [13]. Danach wird dieser Wert mit den Widerstandswerten des Spannungsteilers auf die Originalspannung zurückgerechnet. Bei dem Regler wird für den Sollwert ein gewünschter Spannungswert vorgegeben. Anschliessend wird der Istwert vom Sollwert abgezogen, dadurch erhält man die Differenz. Da der Ausgabewert des Arduinos einem Wert zwischen 0 bis 255 entspricht, muss die Differenz umgerechnet werden. Zusätzlich wird ein PI-Regler benötigt, damit eine exakte und schnelle Regelung möglich ist.

Mit der Formel 4.5 wird die Ausgangsspannung eines digitaler PI-Regler berechnet: [14]

$$Y(k) = Y(k - 1) + B_0U(k) + B_1U(k - 1) \quad (4.5)$$

Wobei Y die Ausgangsspannung, U die Differenzspannung und k der Laufparameter sind. Die Parameter B_0 und B_1 werden folgendermassen berechnet [15]:

$$B_0 = \left(K_p + \frac{K_i T}{2} \right) \quad (4.6)$$

$$B_1 = - \left(K_p - \frac{K_i T}{2} \right) \quad (4.7)$$

Danach muss die Spannungsdifferenz von der Ausgangsspannung subtrahiert werden. Das Resultat der Berechnung wird in die 0 bis 255 Werte umgerechnet und mit dem `analogWrite()` ausgegeben. Die Werte der Ausgangsspannung und der Differenzspannung werden nach der Ausgabe in den Laufparameter $k - 1$ geladen. Das Problem mit dem PI-Regler ist, dass der Thyristorsteller und die Spannungsverstärkung eine Verzögerung besitzen. Ausserdem hat der Arduino keine konstante Abtastrate bei dieser Anwendung. Dadurch ist das Auslegen eines guten Reglers nicht möglich. Der Code für die Drehzahlregelung befindet sich im Anhang im Kapitel B.2. Wie das Blockdiagramm der Formel 4.5 ist in Abbildung 4.6

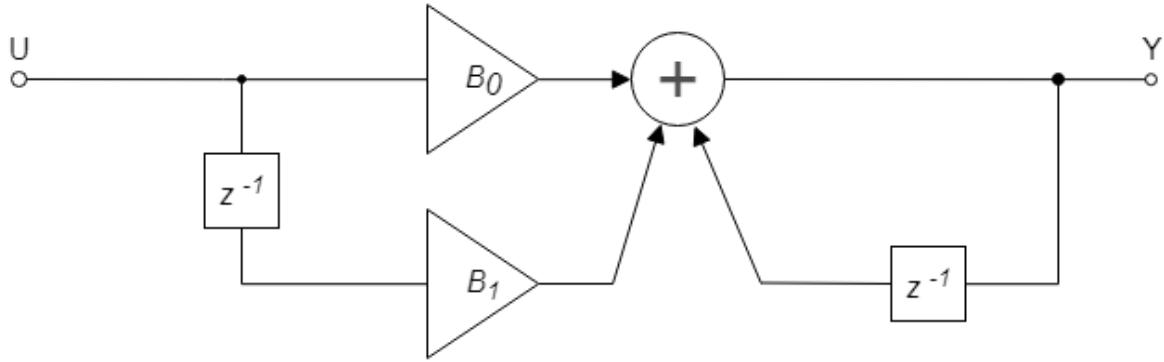


Abbildung 4.6: Blockdiagramm eines digitalen PI-Reglers
[15]

5 Resultate des Messaufbaus

In diesem Kapitel werden die Messresultate des Laboraufbaus analysiert und mit den Werten der Simulationen und den Normen verglichen. Hierbei wurden die Daten der Messungen als csv-Datei gespeichert und anschliessend mit Matlab dargestellt. Ausserdem ist es möglich die FFTs der Signale zu berechnen.

Es sind nur die Messungen des Widerstandes und der ASM, die in Stern geschaltet sind, aufgelistet. Die Messungen in Dreieck sind hier nicht aufgeführt, sie befinden sich als Matlabdateien digital auf dem USB-Stick.

angeben
ob als USB
Stick/CD
oder sonst
abgegeben

5.1 Messungen Ströme

Die Ströme der verschiedenen Ansteuerungarten und Verbrauchern sind auf zu- und unzulässige Oberschwingungen zu untersuchen. Sie müssen zwingend die Werte der Normen 2.11 einhalten. Ist dies der Fall, werden anschliessend noch die Spannungen untersucht. Halten Ansteuerungsarten die Normen nicht ein, werden die Spannungen nicht behandelt. Bei den Schwingungspaketsteuerungen werden die Ströme nicht angeschaut, da die nicht von Interesse sind. Damit man jedoch einen Vergleich zur Simulation hat ist diese Ansteuerung bei der Spannung aufgelistet. Die Vergleiche werden immer mit Hilfe der FFT-Funktion von Matlab durchgeführt.

5.1.1 Messungen Widerstand

Die Resultate der Strommessungen sind wie folgt aufgebaut: Bei den Abbildungen 5.1, 5.2, 5.3 und 5.4 sind zuerst die Ströme, die durch den Culatti fliessen dargestellt. Der Culatti ist ein ohmscher Widerstand mit dem Wert von 150Ω pro Strang. Der maximale Effektivstrom, der dabei durchgelassen werden darf, ist 2.4 A. Die zweite Grafik zeigt das FFT des gemessenen Stromes, jedoch nur von einer Phase an. Da sich alle drei Phasen gleich verhalten, werden die anderen zwei nicht angezeigt. Da die Grenzwerte der Oberschwingungsströme einen maximalen Wert von bis zu 16 A Effektivwert behandelten, wurde der gemessene Wert auf die 16 A hochgerechnet. Dies ist in der dritten Grafik der jeweiligen Abbildung ersichtlich. Anschliessend berechnete man von diesen Strömen das FFT und verglich die Werte der Amplitude tabellarisch mit den dazugehörigen Normen 2.11.1, ersichtlich in der Tabelle 2.2.

Phasenanschnitt 60°

In der Abbildung 5.1 ist das Stromsignal mit einem Phasenanschnittswinkel von 60° ersichtlich.

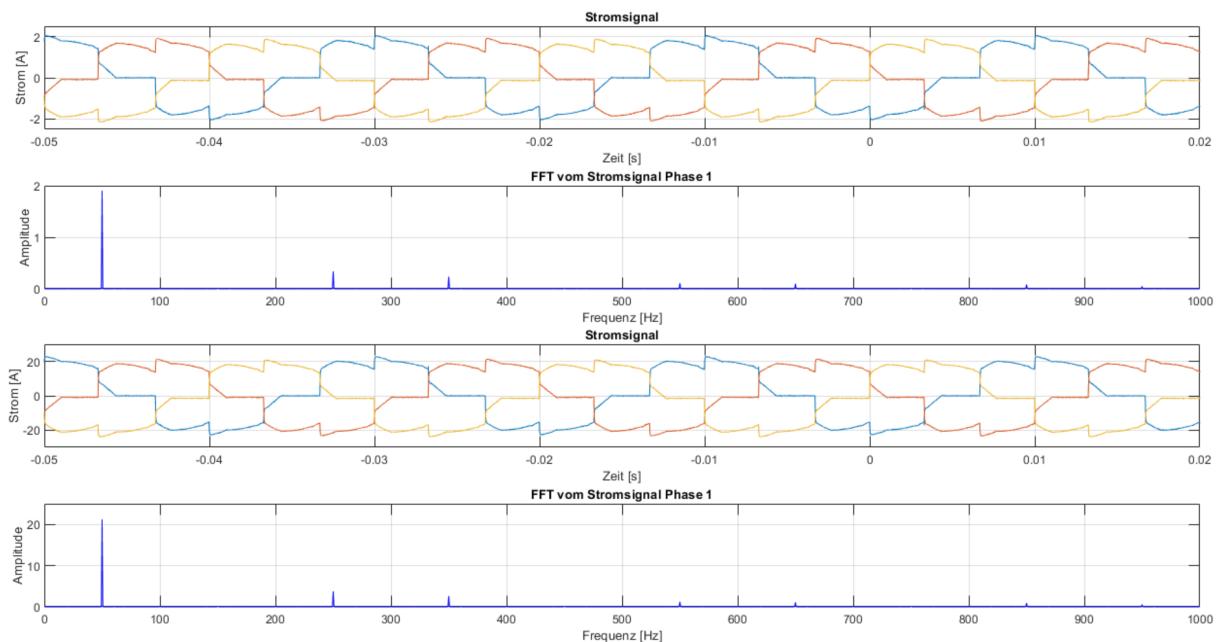


Abbildung 5.1: Messung mit Phasenanschnitt 60°

Wenn die Werten der Messungen in der Tabelle 5.1 mit den Werten der Normen in der Tabelle 2.2 verglichen werden, ist ersichtlich, dass die Amplitudenwerte bei der 5. bis 11. Oberschwingungsordnung zu hoch sind. Es kann gesagt werden, dass sich der Phasenanschnitt mit 60° nicht

Oberschwingungsordnung	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
1	21.1996	100%
5	3.7851	17.86%
7	2.6127	12.32%
11	1.2267	5.79%

Tabelle 5.1: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 60°

eignet um den Widerstand anzusteuernd, da dies nicht den Normen entspricht. Die Spannungen werden deshalb nicht mehr untersucht.

Phasenanschnitt 90°

Die Abbildung 5.2 zeigt die Ansteuerung mit einem Phasenanschnitt von 90° .

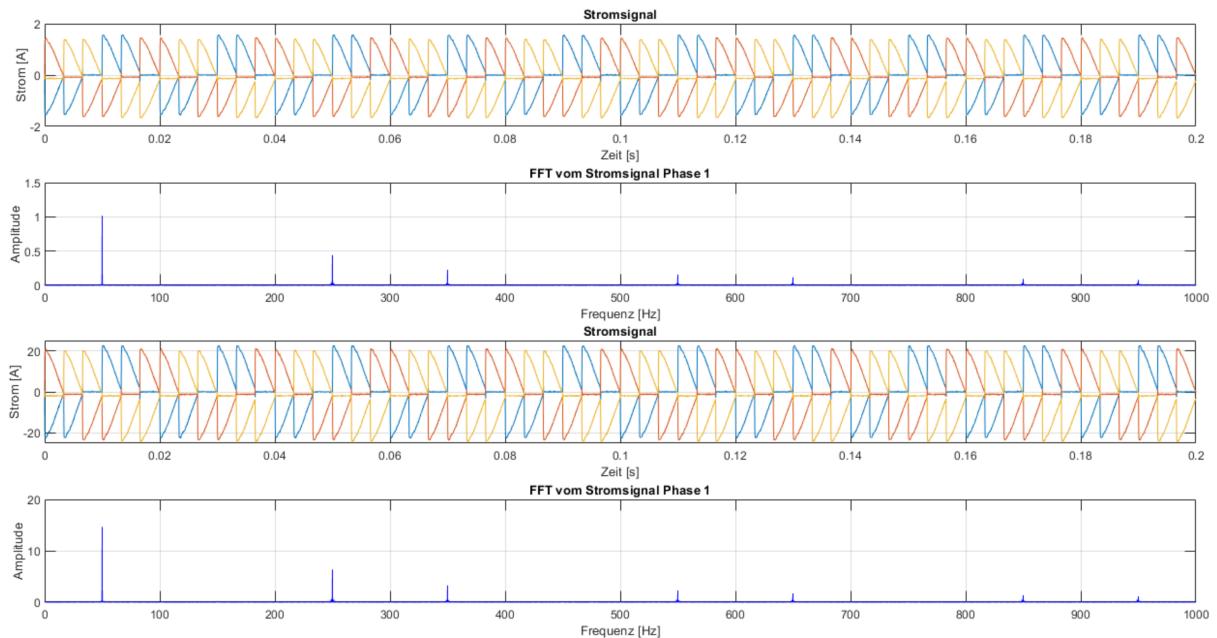


Abbildung 5.2: Phasenanschnitt 90°

Oberschwingungsordnung	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
1	14.647	100%
5	6.3481	43.34%
7	3.2571	22.24%
11	2.273	15.52%

Tabelle 5.2: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 90°

Die Amplitudenwerte der 5. bis 11. Oberschwingungsanordnung, erkennbar in der Tabelle 5.2, sind auch bei dieser Ansteuerung, im Vergleich zu den Normen 2.2, zu hoch. Somit eignet sich auch der Phasenanschnitt mit 90° nicht, um den Widerstand anzusteuernd. Auf die Spannung wird ebenfalls hier nicht mehr eingegangen.

Hartes Auf- und Absteuern

In der Abbildung 5.3 ist das harte Auf- und Absteuern des Widerstands erkennbar.

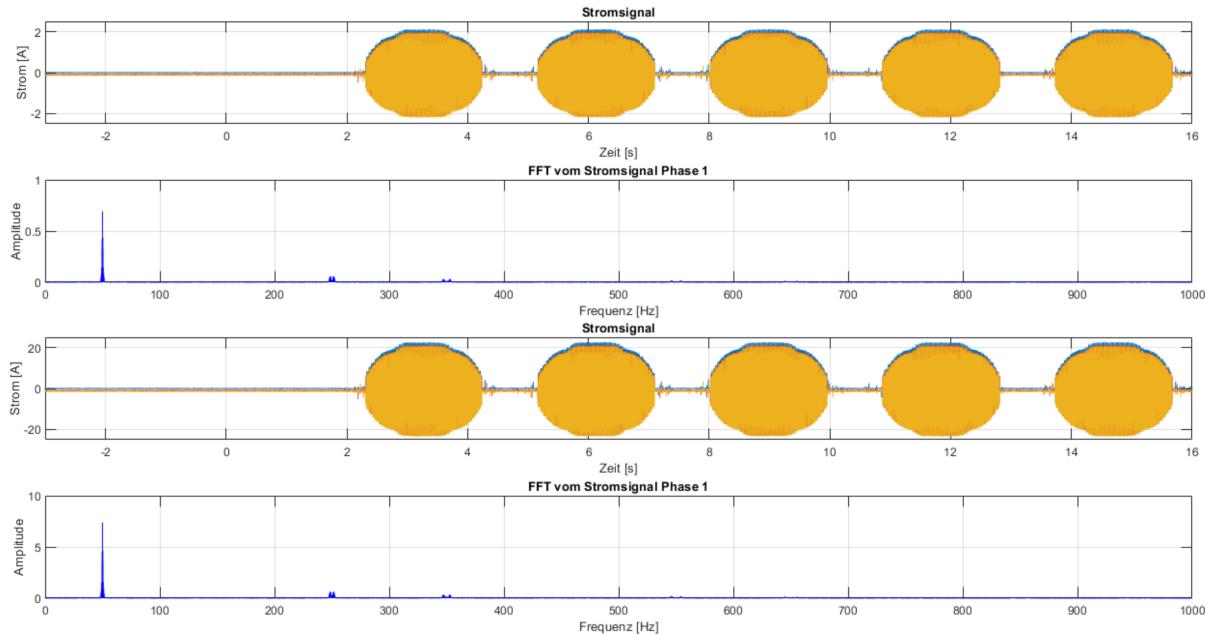


Abbildung 5.3: Messung mit dem harten Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.3	1.5146	20.51%
49.6	4.4853	60.73%
49.7	2.618	35.45%
50	7.3857	100%
50.05	3.73	50.5%
50.35	4.662	63.12%
50.7	1.5504	21%
248.65	0.6226	8.43%
250	0.0883	1.2%
251.45	0.6	8.12%

Tabelle 5.3: Amplitudenwerte bei verschiedenen Frequenzen beim hartem Auf- und Absteuern

Da beim harten Auf- und Absteuern bereits die 5. harmonische Oberschwingung einen Amplitudenwert von 0.1 A hat, wurde darauf verzichtet weitere Werte der harmonischen Schwingungen tabellarisch aufzulisten. Jedoch sind bei dieser Messung die Sub- und Zwischenharmonischen sehr interessant. Diese sind in der Tabelle 5.3 aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Werte der Sub- und Zwischenharmonischen um 50 Hz, mehr als die Hälfte der Grundschwingung, entsprechen. Diese sogenannten Seitenbänder sind auch bei den weiteren harmonischen Oberwellen erkennbar. Sie sind jedoch kleiner als die, um die 50 Hz. Vergleicht man die Werte der Amplitude der Harmonischen sind sie im Bereich der erlaubten Grenzwerte. Deshalb wird noch eine Untersuchung der Spannung vorgenommen.

Sanftes Auf- und Absteuern

In Abbildung 5.4 erkennt man ein sanftes Auf- und Absteuern der Ströme.

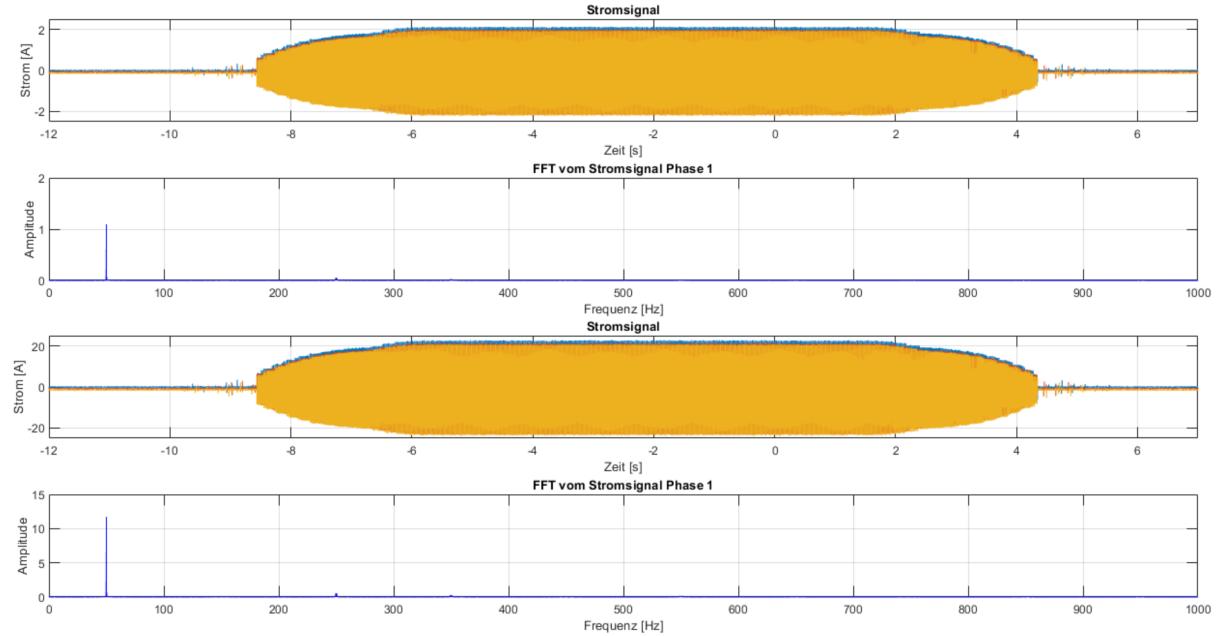


Abbildung 5.4: Messung mit sanftem Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.8	1.148	9.8%
49.85	1.786	15.25%
49.9	1.519	12.97%
49.95	6.703	57.22%
50	11.715	100%
50.05	7.136	60.91%
50.1	1.473	12.57%
50.15	1.923	16.41%
249.65	0.563	4.81%
250	0.186	1.59%
250.35	0.559	4.77%

Tabelle 5.4: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen beim sanftem Auf- und Absteuern

Es ist zu erkennen, dass auch hier fast keine harmonische Oberwellen vorhanden sind. Die Amplitude der Grundschwingung ist jedoch höher als beim harten Auf- und Absteuern. Dies hat den Grund, dass länger auf der vollen Leistung gefahren wurde. Beim sanften Auf- und Absteuern ist das Hoch- und Runterfahren langsamer, deshalb ist das Seitenband bei 50 Hz kleiner. Dies erkennt man auch schon beim visuellen Vergleich der beiden Abbildungen 5.4 und 5.3. Im Vergleich zum harten Auf- und Absteuern, ist die 5. Harmonische 0.39% grösser, welches einem sehr kleinen Unterschied entspricht. Jedoch sind die Peaks der Seitenbänder näher bei 50 Hz. Die Peaks des Seitenbandes bei 250 Hz sind bei dem sanften Auf- und Absteuern kleiner als die beim harten Auf- und Absteuern.

5.1.2 Messungen Asynchronmaschine

Um zu analysieren, wie sich das Signal bei einer ohmsch-induktiver Last verhält, wurden die Messungen mit einem Asynchronmotor wiederholt. Die Strommessung der ASM wurde mit den bekannten Phasenanschnittswinkeln und mit dem sanften Auf- und Absteuern vorgenommen. Dies hat den Grund, dass keine Anwendungen für das harte Auf- und Absteuern oder der Schwingungspaketsteuerung vorhanden sind. Ausserdem wird in der Praxis meistens der Phasenanschnitt verwendet. Wie auch schon beim Widerstand muss der Strom bei der ASM auf die 16 A hochgerechnet werden, um diese mit den Norm tabellarisch vergleichen zu können. Die Messungen der Asynchronmaschine sind ähnlich aufgebaut wie die des Widerstands. Einzig das Spannungssignal des Drehzahlgebers wurde hinzugefügt. Es ist erkennbar, dass das jeweilige Hochfahren des Stromes einen Einfluss auf das Spannungssignal des Drehgeber hat. Je harter man hochfährt desto steiler wird die Kurve des Spannungssignal des Drehgeber.

Phasenanschnitt 60°

In Abbildung 5.5 erkennt man ein einen Phasenanschnitt von 60° der Ströme.

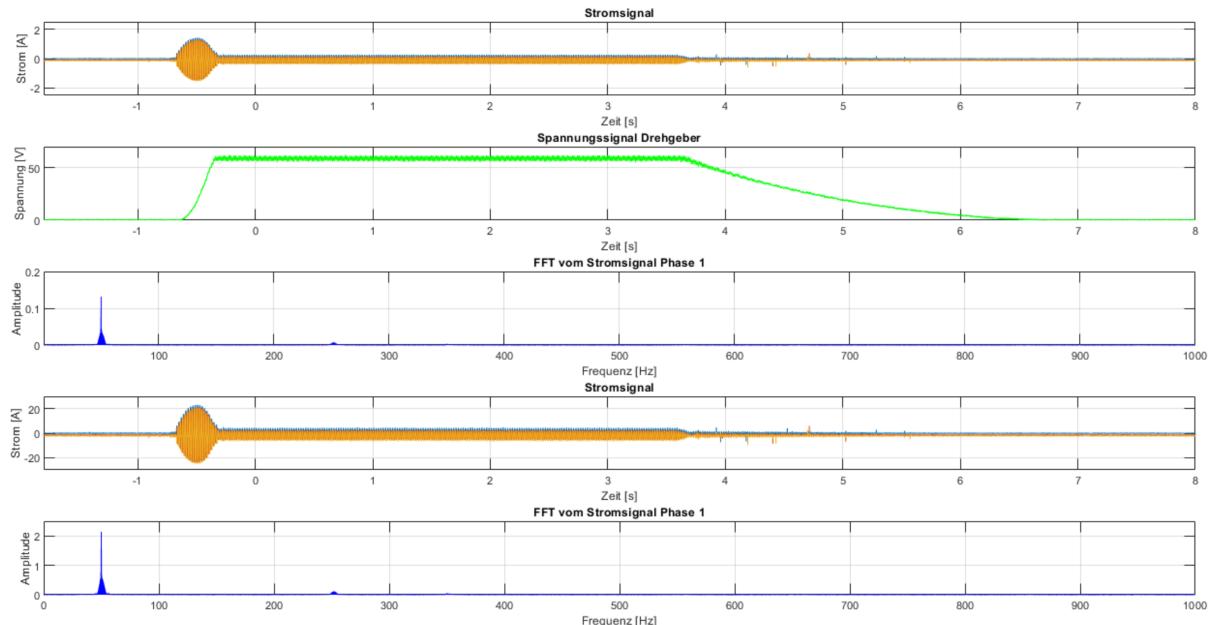


Abbildung 5.5: Messung mit Phasenanschnitt 60°

Frequenz [Hz]	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.7	0.76	35.53%
49.9	1.317	61.57%
50	2.139	100%
50.1	1.53	71.53%
50.3	0.675	31.56%
250	0.07	3.27%

Tabelle 5.5: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 60°

Entgegen den Vorkenntnissen bei Phasenanschnitt mit einem Winkel von 60°, gibt es bei der Ansteuerung der ASM praktisch keine harmonischen Oberwellen sondern fast nur Sub- und Zwischenharmonische. Dies hat den Grund, dass ein reiner Sinus von einer Frequenz von 50 Hz

bei der maximalen Drehzahl entsteht. Die fünfte harmonische Schwingung hat eine Amplitude von 0.07 A und hält somit die Normen 2.11.1 ein. Weitere Harmonische sind nicht zu erkennen. Die Peaks des Seitenbandes um die Grundschwingung sind im Verhältnis mit bis zu 70% sehr hoch.

Phasenanschnitt 90°

In Abbildung 5.6 erkennt man einen Phasenanschnitt von 90° der Ströme.

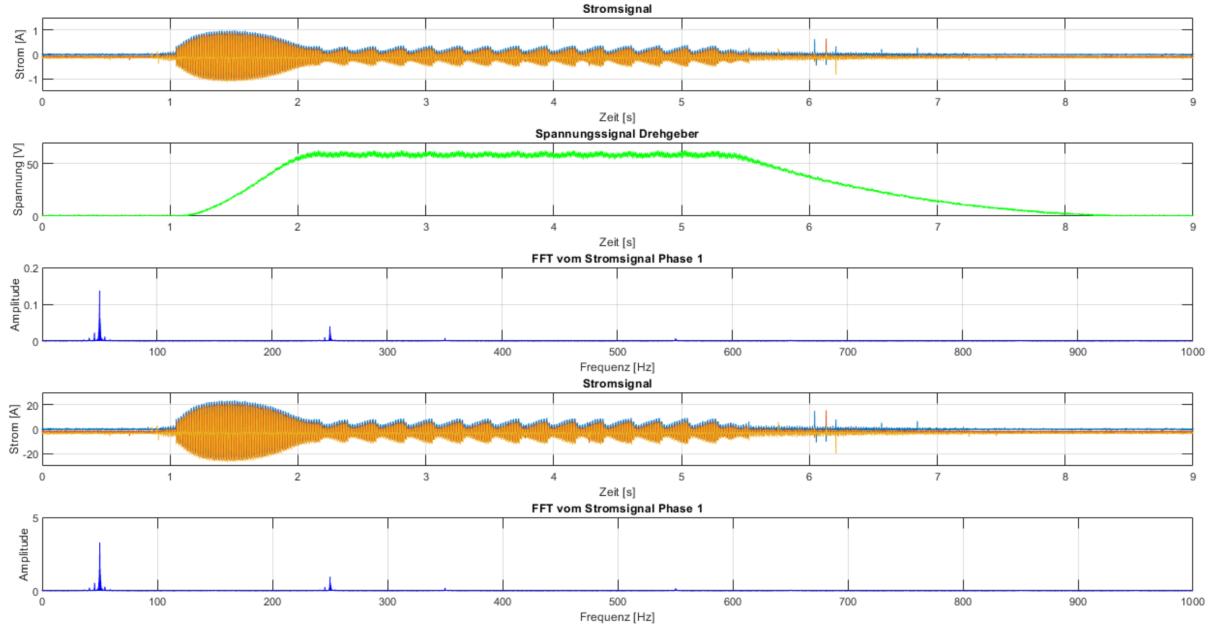


Abbildung 5.6: Messung mit Phasenanschnitt 90°

Frequenz [Hz]	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.7	1.399	42.6%
49.9	2.023	61.61%
50	3.2839	100%
50.1	2.567	78.17%
50.3	1.468	44.71%
250	0.673	20.5%
250.1	0.959	29.2%
250.2	0.687	20.92%

Tabelle 5.6: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 90°

Anders als bei der Ansteuerung mit dem Phasennaschnitt von 60°, treten mit 90° bei der fünften Harmonischen grössere harmonische Oberwellen auf. Zusätzlich sind auch die Sub- und Zwischenharmonischen grösser als bei 60°. Auf der Abbildung 5.6 ist beim Stromsignal ersichtlich, dass die Maschine schwingt. Dies wurde auch beim Testen festgestellt, dass die ASM nicht konstant auf der gleichen Drehzahl drehte. So kann diese Ansteuerungsart nicht verwendet werden um die Maschine anzusteuern. Im Vergleich zum Phasenanschnitt mit 60° sind die Peaks des Seitenbandes um die Grundschwingung noch höher. Auch die fünfte Harmonische entspricht im Verhältnis zur Grundschwingung 20.5%. Die Amplitude jedoch ist immer noch kleiner als der erlaubte Grenzwert der Norm 2.11.1.

Sanftes Auf- und Absteuern

In Abbildung 5.7 erkennt man ein sanftes Auf- und Absteuern der Ströme.

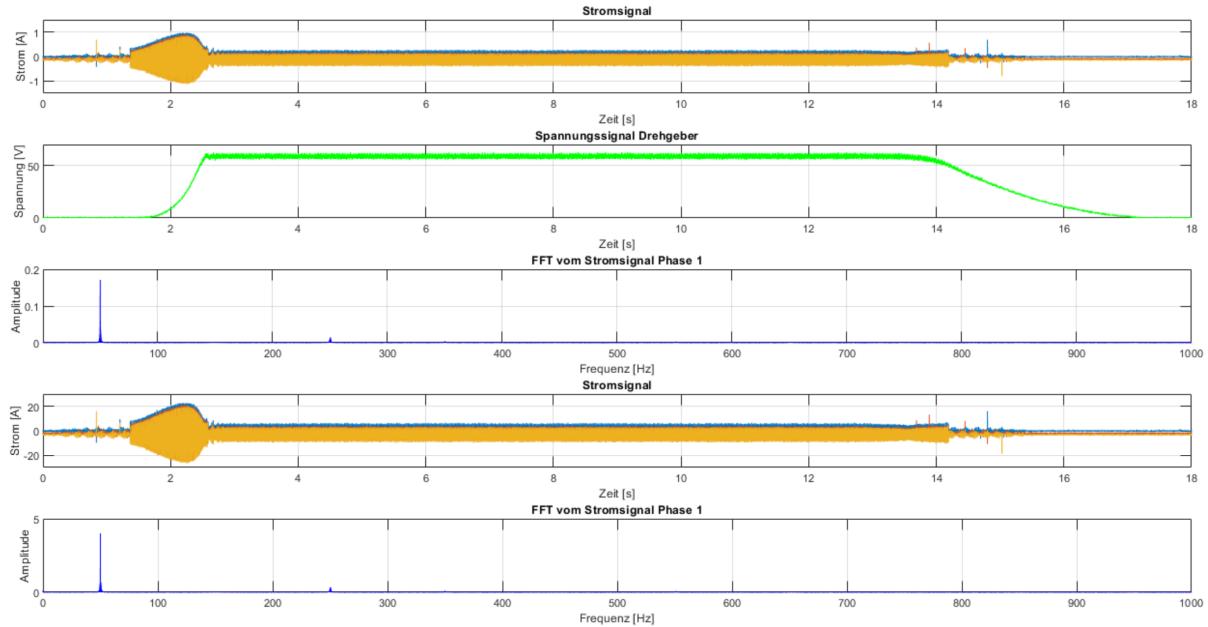


Abbildung 5.7: Messung mit sanftem Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [A]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.8	0.823	20.51%
49.9	1.064	26.51%
49.95	1.716	42.76%
50	4.013	100%
50.05	1.613	40.19%
50.1	1.141	28.43%
50.2	0.878	21.88%
250	0.28	6.98%

Tabelle 5.7: Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei sanftem Auf- und Absteuern

Wie schon bei der Widerstandsmessung mit dem sanften Auf- und Absteuern im Kapitel 5.1.1, sind bei dieser Messung, mit der ASM, die harmonischen Oberschwingungen sehr klein. Sie halten somit die Norm 2.11.1 ein. In der Tabelle 5.7 sind bei verschiedenen Frequenzen die Werte der Amplituden des FFTs aufgelistet. Die Peaks des Seitenbandes um 50 Hz haben ein Verhältnis von bis zu 40% zur Grundfrequenz.

5.2 Messungen Spannungen

Damit man die Funktionen des Laboraufbaues mit den Simulationen vergleichen kann, wurden die Spannungen über dem Widerstand und der Asynchronmaschine mit den verschiedenen Ansteuerungsarten gemessen. Dafür wurden die Spannungssignale und das FFT als Grafik und die interessanten Werte der sub-, zwischenharmonischen und harmonischen Schwingungen tabellarisch aufgelistet. Damit auch die Spannungen mit den Normen verglichen werden können, wurde das Verhältnis der verschiedenen Oberschwingungen zur Grundschwingung in Prozent in die Tabellen eingefügt. Da die Phasenanschnittsteureungen die Normen der harmonischen Oberwellen des Stromes nicht einhalten, werden die Spannungssignale bei diesen Verfahren nicht mehr aufgezeigt. Sie sind jedoch im Anhang E.1 ersichtlich. Die Abbildungen in diesem Kapitel sind so aufgebaut, dass zuerst das Spannungssignal über dem Widerstand und anschliessend das daraus berechnete FFT dargestellt wurde.

5.2.1 Messungen Widerstand

Zuerst wird die Spannung der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5 und 0.8 über dem ohmschen Widerstand untersucht. Anschliessend betrachtet man das harte und sanfte Auf- und Absteuern der Spannung über dem Widerstand. Da bei diesen Verfahren keine harmonischen Schwingungen auftreten, halten sie die Normen im Kapitel 2.11.2 zu den Harmonischen ein. Die Erkenntnisse zu den Sub- und Zwischenharmonischen werden im Kapitel 6 Interpretation der Resultate erläutert.

Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.5

In Abbildung 5.8 ist die Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5 dargestellt.

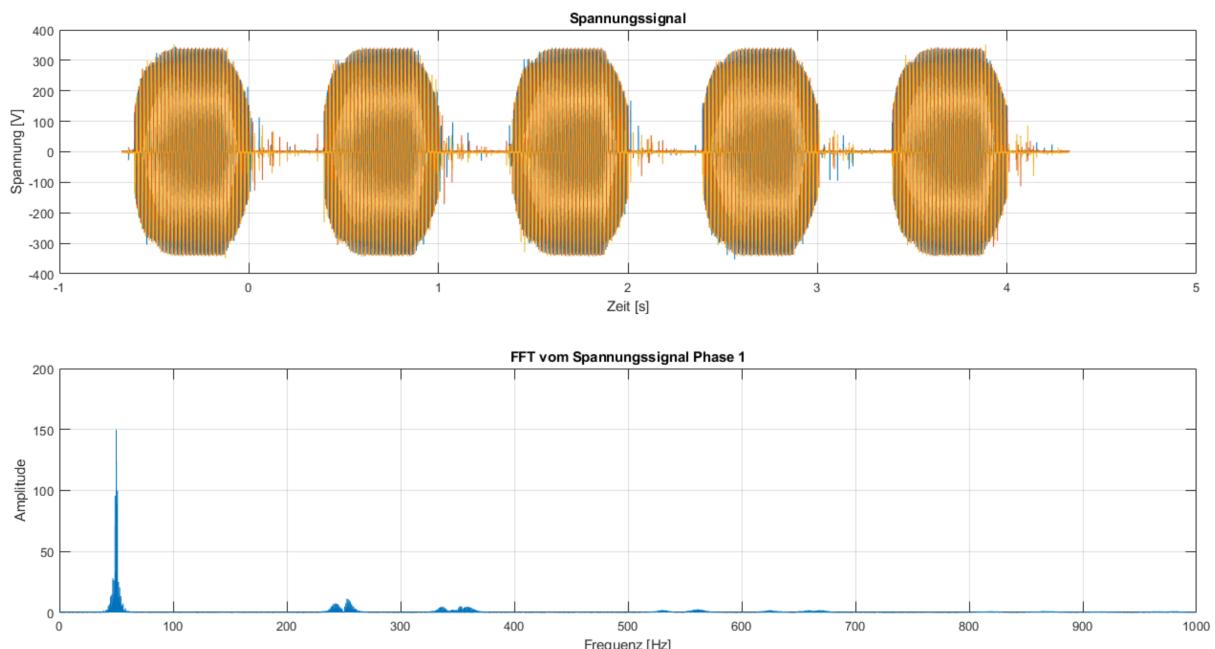


Abbildung 5.8: Messung mit der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
46	14.7351	9.83%
47	28	18.68%
48	26.376	17.59%
49	95.6	63.77%
50	149.92	100%
51	99.8	66.57%
52	25.134	16.76%
53	20.6	13.74%

Tabelle 5.8: Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5

Wie bei den Simulationen im Kapitel 3.2.5 gezeigt, treten bei der Schwingungspaketsteuerung fast keine harmonischen Oberwellen auf. Bei dem FFT erkennt man, dass das Seitenband bei der Grundschwingung relativ breit ist. In der Tabelle 5.8 sind die Werte der Amplituden der Sub- und Zwischenharmonischen aufgelistet. Dabei wurden die Werte aus dem FFT ausgelesen, welche sich in der Nähe der Grundschwingung von 50 Hz befinden und einen hohen Amplitudenwert besitzen.

Die Werte der Tabelle 5.8 wurden mit denen des FFTs der Plecs-Simulation verglichen. Die Grafik und die Werte der Messung und der Simulation befinden sich im Anhang E.5. Dabei wurde festgestellt, dass sich die Kurvenformen der FFT ähnlich aussehen. Jedoch bei näherem betrachten gibt es grosse Unterschiede zwischen den Peak-Werten. In der Simulation schnellen, nach dem Einschalten eines Paketes, die Spannungen sogleich an den Spitzenwert, wobei dies beim Laboraufbau nicht der Fall ist. Deshalb ist bei der Simulation, bei gleicher Zeitdauer, die Spannung länger auf dem Spitzenwert als beim Laboraufbau. Des Weiteren sind alle Bauteile in der Simulation ideal, wobei dies in der Praxis nicht der Fall ist. Deshalb ist auch eine minimale Abweichung des Spitzenwertes ersichtlich. Die Standartabweichung aller aufgeführten Frequenzen beträgt 7.912. Dieser Wert wurde mit Excel berechnet, wobei die Frequenzen als Stichprobe verwendet wurden.

Nochmal überlegen wegen Standartabweichung

Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.8

In der Abbildung 5.9 ist die Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.8 ersichtlich.

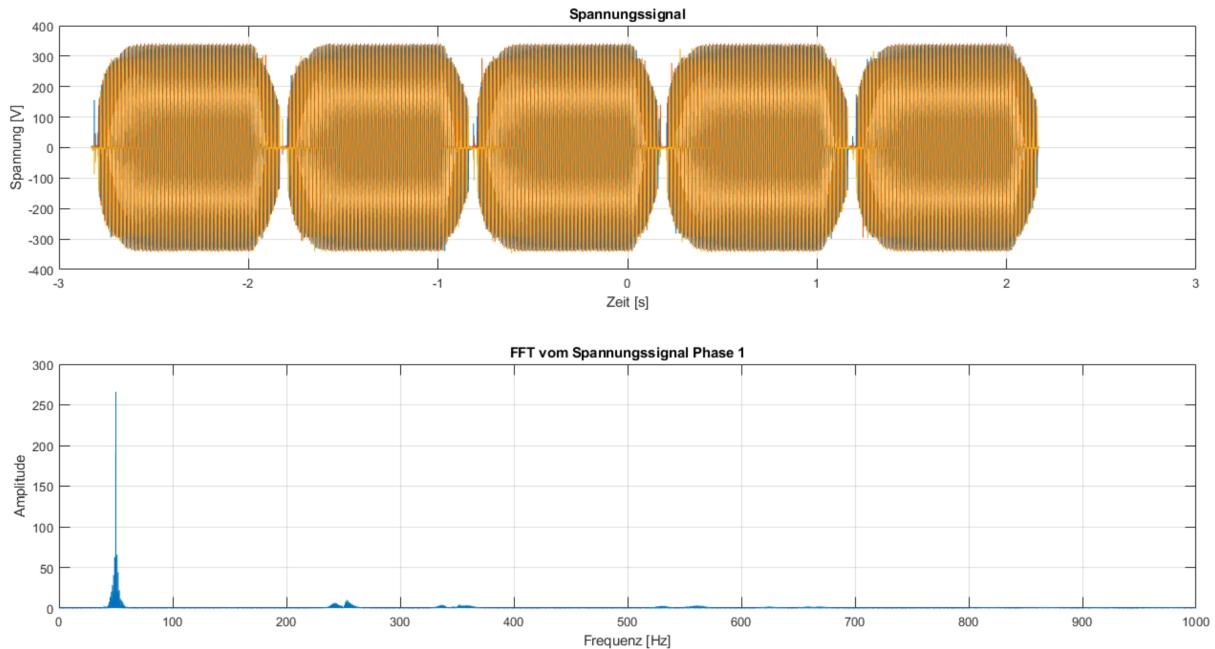


Abbildung 5.9: Messung mit der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.8

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
46	20.173	7.58%
47	28.26	10.62%
48	40.576	15.26%
49	62.694	23.57%
50	265.98	100%
51	65.7	24.7%
52	43.812	16.47%
53	21.939	8.25%

Tabelle 5.9: Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Schwingungspaket 80%

Anders als beim Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5, ist bei 0.8 der Peak bei der Grundfrequenz von 50 Hz deutlich höher. Das kommt davon, da die Spannung eine längere Zeit auf dem Maximum ist. In der Tabelle 5.9 befinden sich die Werte der Amplituden und deren Verhältnis zur Grundschwingung.

Wie bei der Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle von 0.5 wurden auch die Resultate der Messung mit 0.8 mit der Simulation verglichen. Die Tabelle mit den Werten und der grafische Vergleich befindet sich im Anhang E.5. Auch hier gab es Abweichungen bei den verschiedenen Frequenzen zwischen der Simulation und der Messung. Diese waren jedoch bedeutend kleiner als bei der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5. Es resultierte eine Standardabweichung von 2.481. Der Grund, für die niedrigere Abweichung ist, dass die Schwingungspakete eine längere Zeit auf dem Maximum bleiben. Das Hoch- und Herunterfahren haben somit einen kleineren Einfluss auf die Amplitudenwerte. Deshalb ist eine grösse Ähnlichkeit zur Simulation ersichtlich.

Hartes Auf- und Absteuern

Die Abbildung 5.10 zeigt ein hartes Auf- und Absteuern der Spannung.

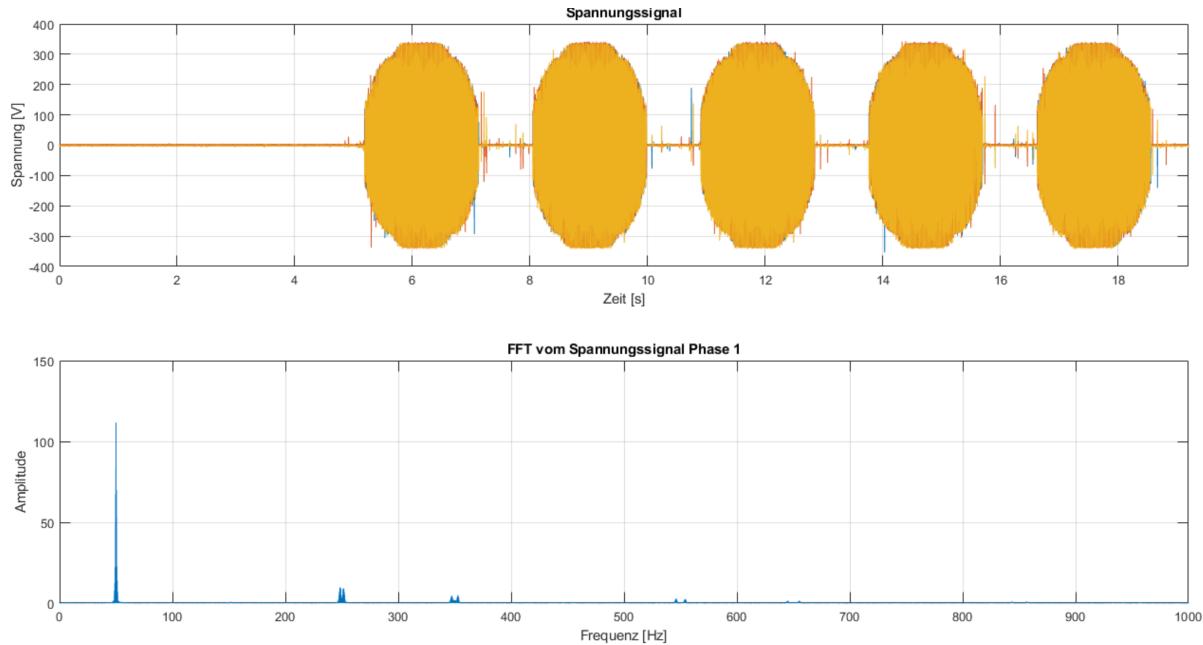


Abbildung 5.10: Messung mit Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.65	67.126	60.11%
49.7	40.9583	36.68%
50	111.6763	100%
50.05	58.2021	52.12%
50.35	70.0651	62.74%
249	9.0297	8.09%
250	1.0487	0.94%
251	1.8206	1.63%

Tabelle 5.10: Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei hartes Auf- und Absteuern

Für die Tabelle 5.10 wurden die höchsten Amplitudenwerte bei der Grundschwingung von 50 Hz und bei der 5. Harmonische bei 250 Hz aufgelistet. Wie auch bei den Schwingungspaketsteuerungen, tritt bei dem harten Auf- und Absteuern die harmonischen Oberschwingung praktisch nicht mehr auf. Jedoch sind auch hier sub- und zwischenharmonische Oberwellen ersichtlich. Diese betragen bei den Frequenzen 49.65 Hz und 50.35 Hz über 60% der Grundschwingung. Bei dem Vergleich des harten Auf- und Absteuern im Laboraufbau und der Simulation wurde ein Unterschied der Signaldauer erkannt. Während bei der Simulation das Auffahren 0.2 s dauert, benötigt der Laboraufbau, mit fast 0.8 s, deutlich länger. Da der Thyristorsteller nicht schneller reagiert, dauerte es fast 1 s bis das nächste Paket hochfährt. Diese Gründe erklären den grossen Unterschied zwischen dem FFT der Simulation und der Messung. Im Kapitel 3.1.3 wird das Verhalten von verschiedenen Anstiegs-Funktionen und die dazu gehörigen FFTs erklärt. Berechnet wurde eine Standartabweichung von 19.812, wobei dieser Wert 2.5 mal grösser ist als die Standartabweichung des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5. Der Vergleich mit der Simulation ist im Anhang im Kapitel E.5 ersichtlich.

Sanftes Auf- und Absteuern

Die Abbildung 5.11 zeigt ein sanftes Auf- und Absteuern der Spannung.

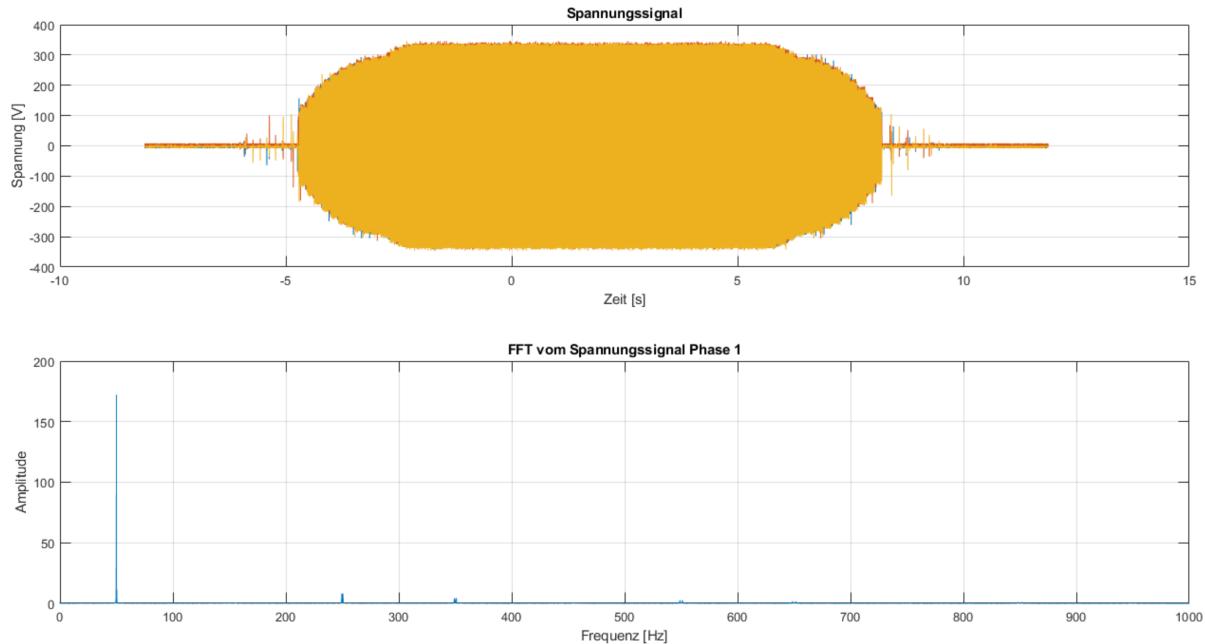


Abbildung 5.11: Messung mit sanftem Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.8	18.522	10.75%
49.85	26.576	15.43%
49.9	29.507	17.131%
49.95	91.266	52.99%
50	172.241	100%
50.05	116.719	67.76%
50.1	28.629	16.62%
50.15	30.076	17.46%
50.2	18.72	10.87%
249.6	8.183	4.75%
250	1.158	0.67%
250.4	7.466	4.33%

Tabelle 5.11: Amplitudenwerte bei der Frequenzen beim sanften Auf- und Absteuern

Im visuellen Vergleich mit dem hartem Auf- und Abfahren zeigt das FFT, dass die Frequenzbänder dünner und der Peak bei 50 Hz grösser geworden sind. In der Tabelle 5.11 sind die höchsten Amplitudenwerte der Frequenzen, die sich in der Nähe der Grundschwingung von 50 Hz und der 5. Harmonischen bei 250 Hz aufhalten, aufgelistet. Der Vergleich mit der Simulation, befindet sich im Anhang im Kapitel E.5, zeigt grosse Unterschiede der Amplitudenwerte auf. Ein Grund dafür ist, dass die Simulation für das Hoch- und Runterfahren eine Zeitdauer von 0.3 s benötigt, wobei sie bei der Messung 3 s beträgt. Zusätzlich ist bei der Simulation während 6 s die Spannung auf dem Spitzenwert, beim Laboraufbau sind es jedoch 7 s. Berechnet wurde für die Standartabweichung ein Wert von 88.904. Es ist ersichtlich, dass die beiden Funktionen nicht miteinander verglichen werden können, da die Abweichung zu gross ist.

5.2.2 Messungen Asynchronmaschine

Auch bei der Asynchronmaschine wurden die verschiedenen Ansteuerungsarten, Phasenanschnitt mit 60° und 90° , Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.5 und 0.8 und dem harten und sanften Auf- und Absteuern durchgeführt. Dabei stellte man fest, dass sich die Schwingungspaketsteuerungen und das harte Auf- und Absteuern nicht für einen Asynchronmotor eignen. Der Motor fährt zu schnell Hinauf und Hinunter und befindet sich nie in einem geeigneten stationären Zustand. Deshalb verzichtete man bei der Messung auf diese Verfahren. Der Aufbau der Abbildungen und Tabellen ist gleich wie bei dem Widerstand.

Phasenanschnitt 60°

Bei der Abbildung 5.12 verwendete man einen Phasenanschnittswinkel von 60° .

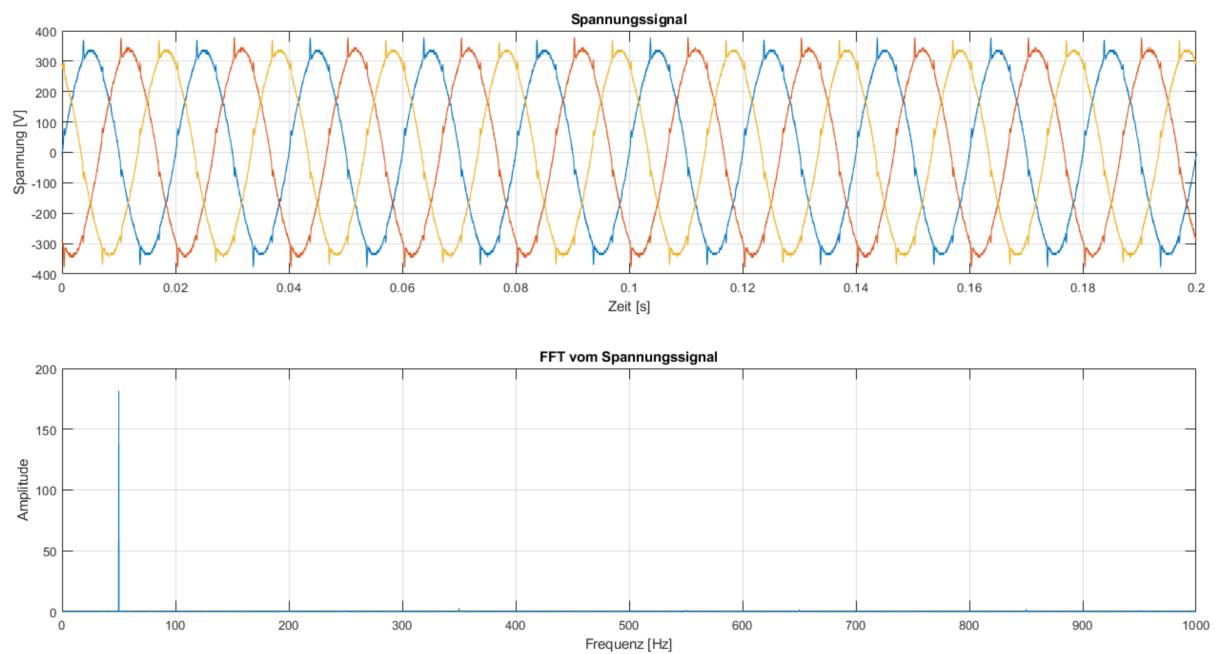


Abbildung 5.12: Messung mit Phasenanschnitt 60°

Oberschwingungsordnung	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
1	181.5519	100%
5	1.1065	0.61%
7	2.8728	1.58%
11	1.4537	0.8%

Tabelle 5.12: Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Phasenanschnitt 60°

Anders als beim Phasenanschnitt von 60° mit dem ohmschen Widerstand, treten bei dem Asynchronmotor fast keine harmonischen Oberschwingungen auf. Da diese Peaks im FFT nicht ersichtlich sind, wurden die Amplituden der Oberschwingungen bis zur 11. Ordnung in der Tabelle 5.12 aufgeführt. Beim Ansteuern mit dem Winkel von 60° wurde bemerkt, dass die Maschine bereits mit maximaler Drehzahl dreht. Es macht bei den Spannungssignalen keinen Unterschied ob die ASM mit einem Winkel von 60° oder 0° angesteuert wird. Anders als beim Phasenanschnitt mit 60° bei ohmscher Last, sind mit dem gleichen Anschnittswinkel bei der ASM keine Sub- und Zwischenharmonische in der Nähe der Grundfrequenz ersichtlich. Im Verhältnis zur Grundschwingung hat die 7. Ordnung die maximale Abweichung von 1.58%. Die Werte der harmonischen Schwingungen halten somit die Normen in der Tabelle 2.3 ein.

Phasenanschnitt 90°

Die Abbildung 5.13 zeigt eine Steuerung mit einem Phasenanschnitt von 90°.

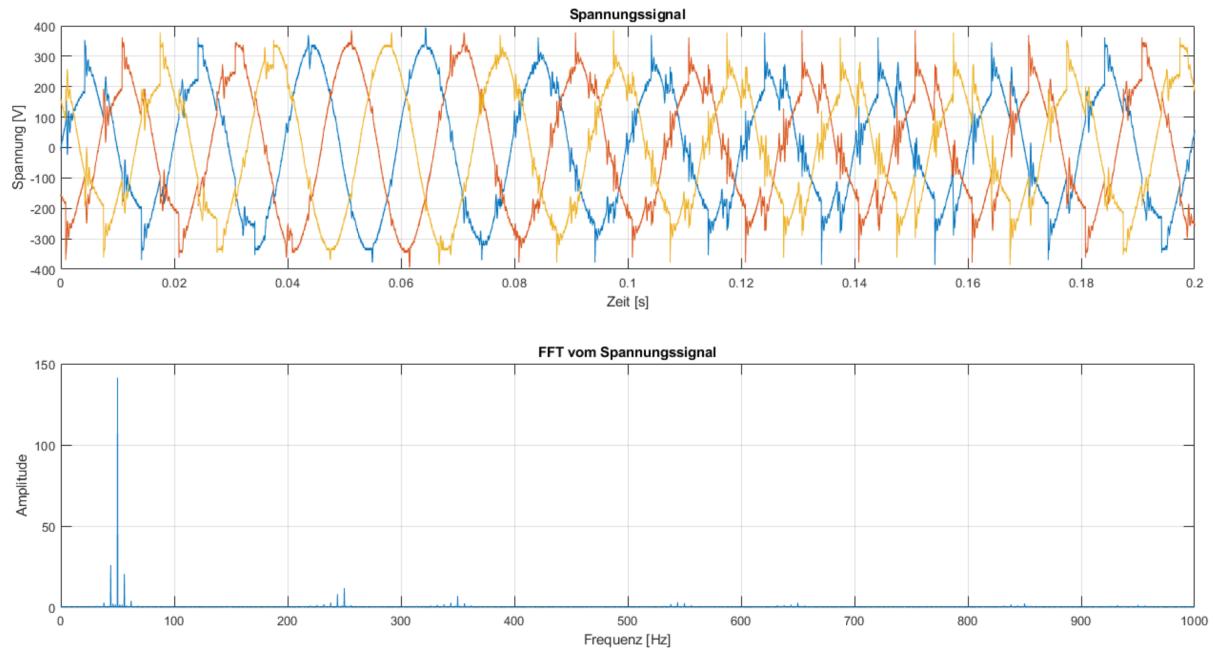


Abbildung 5.13: Messung mit Phasenanschnitt 90°

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
44	25.896	18.31%
50	141.3976	100%
56	20.4508	14.46%
244	7.9778	5.64%
250	11.6537	8.24%
256	1.1655	0.82%
344	2.7272	1.93%
350	6.8988	4.88%
356	2.3509	1.66%

Tabelle 5.13: Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Phasenanschnitt 90°

Anders als beim Phasenanschnitt mit 60° , beginnt der Asynchronmotor bei einem Winkel von 90° zu schwingen. Dieses Schwingen ist in der Abbildung 5.13 beim Spannungsverlauf ersichtlich. Wird das FFT betrachtet, sind sub- und zwischenharmonische, sowie harmonische Oberwellen erkennbar. Die Amplitudenwerte und das Verhältnis zur Grundschwingung ist für die 1., 5. und 7. Harmonischen, sowie deren Seitenbänder in der Tabelle 5.13 aufgelistet. Betrachtet man die Verhältnisse der harmonischen Oberwellen, sind die deutlich über den Werten der vorgeschriebenen Normen 2.11.2. Somit kann der Asynchronmotor nicht mit diesem Verfahren betrieben werden.

Sanftes Auf- und Absteuern

Die Abbildung 5.14 zeigt ein sanftes Auf- und Absteuern der Spannung.

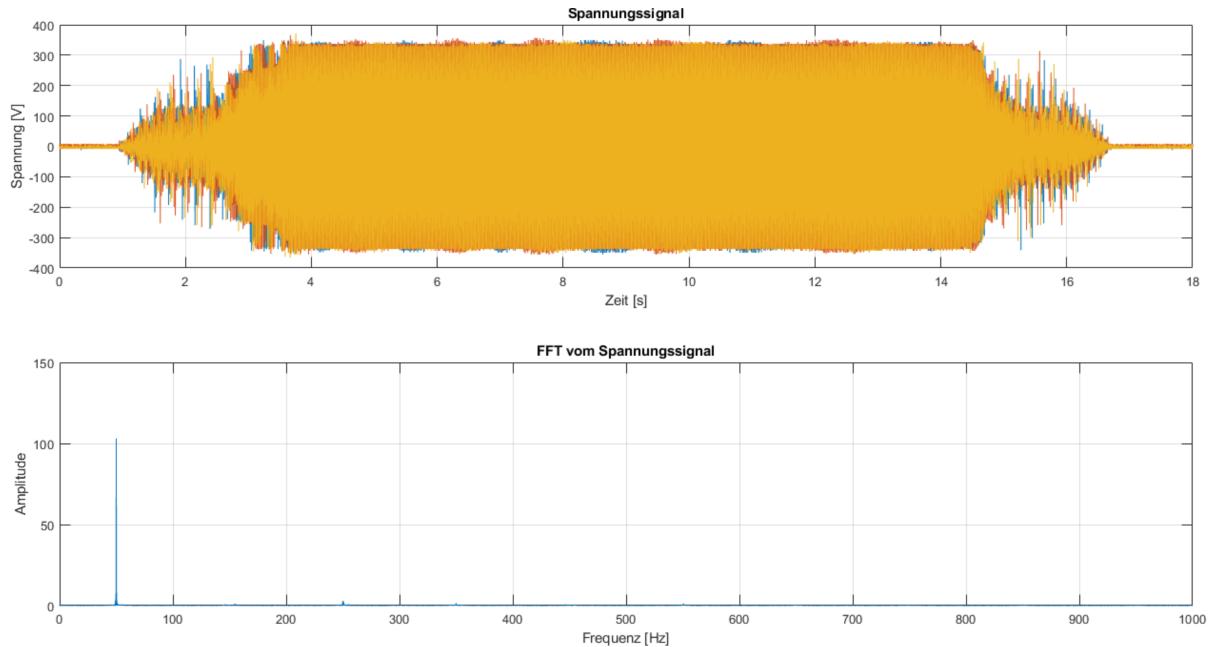


Abbildung 5.14: Messung mit sanftem Auf- und Absteuern

Frequenz [Hz]	Amplitude [V]	Verhältnis zur Grundschwingung
49.85	17.3653	16.85%
49.95	70.316	68.23%
50	103.0639	100%
50.05	40.167	38.97%
50.1	20.209	19.61%
249.95	2.607	2.53%
250	1.689	1.64%
250.05	2.5084	2.43%

Tabelle 5.14: Amplitudenwerte bei den Frequenzen bei sanftem Auf- und Absteuern

Bei diesem Steuerungsverfahren sind die harmonischen Schwingungen mit den dazu gehörigen Seitenbändern nur noch minimal erkennbar. Die Resultate der Amplitudenwerte und das Verhältnis zur Grundschwingung befinden sich in der Tabelle 5.14. Die meisten zwischenharmonischen Schwingungen treten um bei der Grundfrequenz von 50 Hz auf. Es ist eine Ähnlichkeit der Seitenbänder zum Verfahren mit dem Widerstand ersichtlich. Vergleicht man die Werte der harmonischen Schwingungen mit den Normen 2.11.2, befinden diese sich unter den Grenzwerten.

5.3 Sparvariante

Wie im Kapitel 3.2.8 beschrieben, werden bei der Sparvariante nur ein oder zwei Thyristoren angesteuert. Das Spannungs- und Stromsignal sollen dabei etwa die gleiche Form besitzen wie bei der dreiphasigen Ansteuerung. Da dies bei der Ansteuerung mit einem Thyristor nicht der Fall ist, sind die Messresultate bei diesem Verfahren nicht aufgeführt. Für die Sparvarianten wurden die Verfahren des sanften und harten Auf- und Absteuern betrachtet, da hauptsächlich diese von Interesse sind. Bei den Messung erkennt man, dass die harmonischen Oberwellen der Spannung des Asynchronmotors nicht mit den Normen übereinstimmen. Das gleiche Verhalten wurde bei der ohmschen Last mit harter Ansteuerung bemerkt. Daher wird nur noch das sanfte Hoch- und Runterfahren beim Widerstand analysiert. Alle anderen Messungen die nicht den Normen entsprechen, sind im Anhang im Kapitel E.3 ersichtlich. Die Abbildungen 5.15 und 5.16 sind so aufgebaut, dass zuerst das Spannungs- oder Stromsignal ersichtlich ist. Anschliessend werden die FFT der drei Phasen berechnet und dargestellt. Da es sich um eine unsymmetrische Belastung handelt, wurden alle Phasen separat mit den Normen 2.11 verglichen.

5.3.1 Strommessung Sparvariante mit einem Widerstand und zwei Thyristoren

In der Abbildung 5.15 erkennt man ein sanftes Hoch- und Herunterfahren des Stromes, gemessen durch den Widerstand.

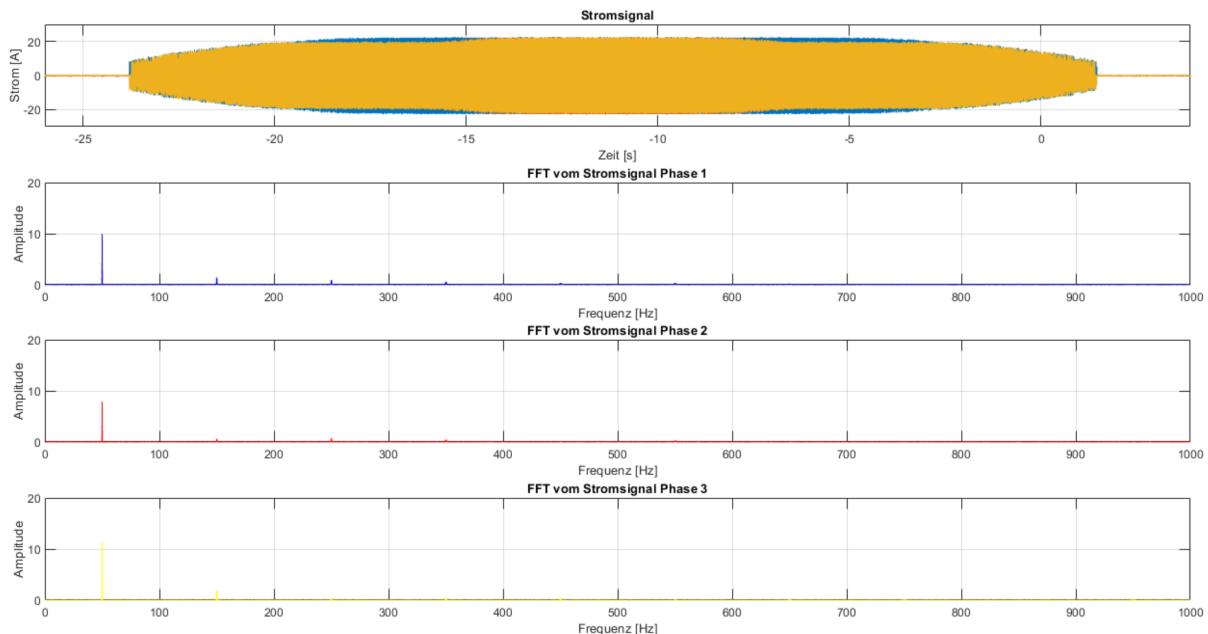


Abbildung 5.15: Strommessung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren

Damit die Oberschwingungsströme mit den Grenzwerten der Normen 2.11.1 verglichen werden kann, wurde der Effektivwert des Stromes auf die 16 A hochgerechnet. Betrachtet man die verschiedenen FFTs der Phasen sind unterschiedliche Peak-Werte zu erkennen. Dies kommt zu stande, da es sich um eine unsymmetrische Belastung handelt und die Phase 3 als Rückleiter fungiert. In der Tabelle 5.15 werden die Werte der Amplituden bei verschiedenen Frequenzen und das Verhältnis zur Grundschwingung aufgelistet. Vergleicht man die Werte der 3. und 5. Harmonischen mit den Normen 2.11.1, so halten sie die Grenzwerte bei allen drei Phasen ein. Die anderen harmonischen Schwingungen, die nicht in der Tabelle sind, halten die Normen ebenfalls ein.

Frequenz [Hz]	Amplitude Phase 1 [A]	Amplitude Phase 2 [A]	Amplitude Phase 3 [A]
49.9	4.887	3.749	2.354
49.95	9.018	7.485	9.618
50	9.951	7.881	11.225
50.05	5.193	4.31	3.031
50.1	3.057	1.522	1.809
149.93	1.381	0.525	1.838
150	0.899	0.552	1.103
150.2	1.386	0.544	1.829
250	0.372	0.273	0.291
Frequenz [Hz]	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 1	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 2	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 3
49.9	49.11%	47.57%	20.97%
49.95	90.62%	94.98%	85.68%
50	100%	100%	100%
50.05	52.19%	54.69%	27%
50.1	30.72%	19.32%	16.12%
149.95	13.88%	6.66%	16.37%
150	9.03%	7%	9.83%
150.05	13.93%	6.9%	16.29%
250	3.74%	3.46%	2.59%

Tabelle 5.15: Amplitudenwerte bei der Strommessung mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern

5.3.2 Spannungsmessung Sparvariante mit einem Widerstand und zwei Thyristoren

Die Abbildung 5.16 zeigt das Spannungssignal über dem Widerstand.

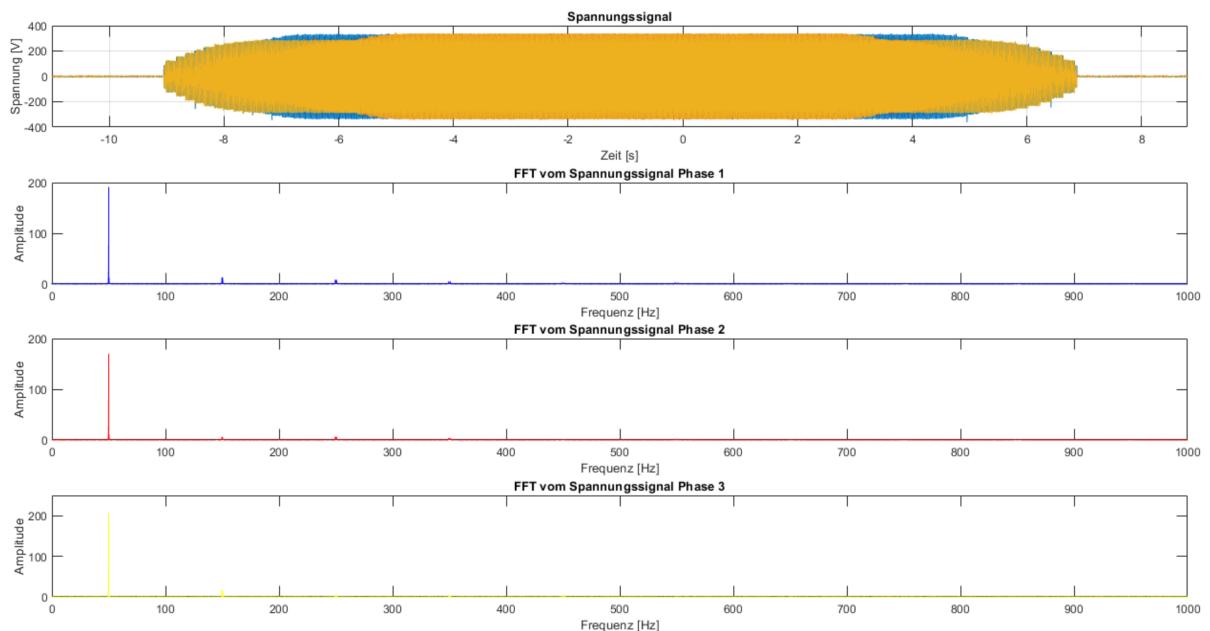


Abbildung 5.16: Messung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren

Die Spannungsverläufe auf der Abbildung 5.16 sehen visuell ähnlich aus wie das sanfte Auf- und Absteuern mit drei Thyristoren, ersichtlich in der Abbildung 5.11. Der einzige Unterschied ist, dass beim Hoch- und Runterfahren die drei Phasen nicht alle gleich hoch sind. Dies resultiert in einem FFT mit unterschiedlichen Amplitudenhöhen für die verschiedenen Phasen. Die Werte des FFTs sind in der Tabelle E.2 aufgelistet.

Frequenz [Hz]	Amplitude Phase 1 [V]	Amplitude Phase 2 [V]	Amplitude Phase 3 [V]
49.9	38.5998	19.6499	34.7131
49.95	77.5993	82.1127	60.2946
50	191.1857	169.7545	206.7036
50.05	125.8716	123.6057	126.0935
50.1	42.6127	17.4015	26.3464
149.8	12.7189	3.9393	16.14
150	2.6765	4.3294	5.5055
150.2	9.6611	5.9313	13.152
250	2.05	0.641	2.334
Frequenz [Hz]	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 1	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 2	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 3
49.9	20.19%	11.58%	16.79%
49.95	40.59%	48.37%	29.17%
50	100%	100%	100%
50.05	65.84%	72.81%	61%
50.1	22.29%	10.25%	12.75%
149.8	6.65%	2.32%	7.81%
150	1.4%	2.55%	2.66%
150.2	5.05%	3.49%	6.36%
250	1.07%	0.38%	1.13%

Tabelle 5.16: Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern

Das Spannungssignal, welches mit nur zwei Thyristoren angesteuert wurde, hat eine visuelle Ähnlichkeit mit dem sanften Auf- und Absteuern der drei Thyristoren 5.11. Der einzige Unterschied entsteht beim Hoch- und Runterfahren. Die drei Phasen erreichen wegen der unsymmetrischen Belastung nicht die gleiche Höhe. Dies ist bei den FFT ebenfalls ersichtlich. Es sind unterschiedliche Amplitudenhöhen aufgezeigt. Die Werte der FFTs sind in der Tabelle E.2 aufgelistet. Vergleicht man wiederum die Werte der Harmonischen Schwingungen mit den Grenzwerten der Normen, erfüllen sie jedoch den einzuhaltenden Bereich.

5.4 Leistungsfaktor

Um den Leistungsfaktor für den Phasenanschnitt berechnen zu können, wird die Formeln im Kapitel 2.9 verwendet. Jedoch funktioniert diese Formeln bei der Kombination der verschiedenen Verfahren oder dem Hochfahren durch den Phasenanschnitt nicht. Mit folgender Formel kann der Leistungsfaktor ebenfalls berechnet werden:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (5.1)$$

Um die Wirkleistung zu erhalten, können die Strom- und Spannungswerte multipliziert werden:

$$P = u(t) \cdot i(t) \quad (5.2)$$

Für die Scheinleistung müssen die Effektivwerte der Spannung und des Stromes multipliziert werden:

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms} \quad (5.3)$$

Wobei der Effektivwert des Stromes und der Spannung über die gesamte Zeitdauer berechnet wurde. Der Matlabcode dieser Berechnungen befindet sich im Anhang im Kapitel B.1.

Die Resultate der Leistungsfaktorberechnungen sind in der Tabelle 5.17 aufgeführt.

Ansteuerungsart ASM	Leistungsfaktor
Sanftes Auf- und Absteuern	0.2947
Sanftes Auf- und Absteuern mit 150Ω Vorwiderstand	0.3493
Phasenanschnitt 90°	0.4879
Phasenanschnitt 60°	0.4155
Ansteuerungsart Widerstand	Leistungsfaktor
Sanftes Auf- und Absteuern	0.9987
Hartes Auf- und Absteuern	0.9988
Phasenanschnitt 90°	0.9953
Phasenanschnitt 60°	0.999

Tabelle 5.17: Leistungsfaktor mit verschiedenen Ansteuerungsverfahren bei der ASM und dem Widerstand

Bei der ASM im Leerlauf gilt, je näher der Leistungsfaktor bei 0 ist desto besser. Da der Leistungsfaktor das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung ist und sich die Maschine im Leerlauf befindet, wird die Wirkleistung nur für die Ummagnetisierungs- und Eisenverluste benötigt. Wenn der Leistungsfaktor höher ist, heisst dies, dass mehr Verlustleistung entsteht. Um dies zu beweisen wurde ein Vorwiderstand mit 150Ω in den Stromkreis geschaltet. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich wie erwartet mit dem Vorwiderstand der Leistungsfaktor erhöht, da zusätzlich Wirkleistung im Widerstand verheizt wird. Wenn der Leistungsfaktor der verschiedenen Ansteuerungsarten analysiert werden, kann klar gesagt werden, dass sich das sanfte Auf- und Absteuern am besten eignet für die ASM.

Bei Ohmschen Lasten gilt jedoch, je näher der Leistungsfaktor bei 1 ist, desto besser. Bei den Messungen mit den verschiedenen Ansteuerungsarten wurde festgestellt, dass der Leistungsfaktor beim Phasenanschnitt mit einem Winkel von 60° am höchsten ist. Jedoch verbietet die Normen den Gebrauch des Phasenanschnittes mit den Winkeln von 90° wegen den erhöhten Werten der Amplituden. Deshalb macht es Sinn nur das sanfte und harte Auf- und Abfahren zu vergleichen. Bei diesen zwei Ansteuerungsverfahren hat das harte Auf- und Absteuern einen höheren Leistungsfaktor. Jedoch ist der Unterschied von 0.0001 sehr klein und kann praktisch vernachlässigt werden.

6 Interpretation der Resultate

Bei den Interpretationen der Resultate werden noch einmal die unterschiedliche Messungen und deren Auswertung analysiert und wichtige Schlussfolgerungen dokumentiert. Dabei haben das Einhalten der Normen die oberste Priorität. Wenn eine Ansteuerungsart die Normen bei dem Widerstand nicht einhält, muss dies bei der ASM nicht auch der Fall sein. Des Weiteren wird begründet welche Ansteuerungsarten, bei den verschiedenen Lasten, sinnvoll ist. Schlussendlich wird bei den Messungen der höchst beziehungsweise der niedrigste Leistungsfaktor bestimmt.

6.1 Resultate der Ansteuerungsarten beim Widerstand

Für den Widerstand wurden zuerst die Strommessungen der verschiedenen Ansteuerungsarten durchgeführt. Die Resultate der FFTs konnten unmittelbar mit den Grenzwerten der Oberschwingungsströme 2.11.1 verglichen werden. Dabei wurden, die Ströme auf den maximalen Effektivstrom von 16 A hoch gerechnet. Dazu wurde der höchste Spitzenwert der Messdaten genommen und auf 16 A hoch skaliert. Nur so war es möglich die maximalen erlaubten Ströme der Messungen mit den Normen zu vergleichen. Die Phasenanschnittsteuerungen mit den Winkeln von 60° und 90° erfüllten die Normen nicht. Da bei der Oberschwingungsströme nur die Grenzwerte der harmonische Schwingungen aufgelistet sind und diese bei der Schwingungspaketsteuerung nicht auftreten, wurde bei dieser Ansteuerungsart die Ströme nicht gemessen. Das sanfte und harte Auf- und Absteuern hingegen verglich man mit den Normen 2.11.1, da bei diesen Ansteuerungsarten harmonische Oberschwingungsströme auftreten. Diese sind jedoch im Verhältnis zur Grundschiwingung so klein, dass sie die Grenzwerte einhalten.

Wenn die Ansteuerungsart die Grenzwerte der Oberschwingungsströme einhalten, wurden die Messwerte der Spannungen mit den Grenzwerten der harmonischen Oberschwingungsspannung, die in der Norm 61000-2-2 2.11.2 behandelt wurden, verglichen. Dabei sind die 5., 7. und 11. Harmonischen in den Tabellen der Messwerte aufgelistet. Die sonstigen harmonischen Oberschwingungen, bis zur 23. Ordnung, wurden ebenfalls mit der Norm verglichen, jedoch nicht mehr in die jeweiligen Tabellen eingeführt. Dabei erfüllten das sanfte und harte Auf- und Absteuern ebenfalls die Grenzwerte der Oberschwingungsspannung.

Die Norm 61000-2-2 enthält ausserdem die Grenzwerte, welche die Spannungen der sub- und zwischenharmonischen Schwingungen einhalten müssen. Sie bezieht sich jedoch nur auf die 230 V-Systeme. Deshalb konnten die Messresultate nicht mit dieser Norm verglichen werden. Die Auswirkungenen der sub- und zwischenharmonischen Schwingungen sind im Kapitel 2.11.2 beschrieben. Aus der Tabelle 2.3 wurde jedoch erkannt, dass die zugelassenen Grenzwerte welche sich näher bei der Grundschiwingung befinden, ein grösser Peak-Wert haben dürfen, als jene die weiter weg von der Grundschiwingung sind. So kann argumentiert werden, dass beim sanften und harten Auf- und Absteuern die Seitenbänder um die Grundschiwingung näher beieinander sind als bei der Schwingungspaketsteuerung. Welche Auswirkungen der Abstand der Seitenbänder hat, konnte nicht geklärt werden. Es wird vermutet, dass je näher die Bänder an den jeweiligen harmonischen Ordnung sind, desto weniger Störungen werden ins Netz zurück gespeist. Somit würden die sanfte- und harte Ansteuerung einen saubereren Sinus heraus geben als die Schwingungspaketsteuerungen. Vergleicht man die Seitenbänder der erst genannten Verfahren miteinander erkennt man, dass die Frequenzen, bei denen die sub- und zwischenharmonisch Schwingungen auftreten, beim der sanft-Ansteuerung näher beieinander sind.

Der THD-Wert der Messungen ist nicht bestimmt worden, da diese Berechnungen nur für den stationären Betrieb konzipiert sind. Da keines der Signale welche die Stromnormen erfüllten stationär sind, wurden diese Berechnungen weggelassen. Der Flickerwert wurde ebenfalls nicht gemessen, da keine geeignete Laboreinrichtung und kein Messgerät vorhanden war.

Wenn die Leistungsfaktoren des sanften und harten Auf- und Absteuerns miteinander verglichen werden fällt auf, dass diese fast gleich gross sind. Der kleine Unterschied von 0.0001 kann vernachlässigt werden. Deshalb kann aufgrund des Leistungsfaktors gesagt werden, dass die beiden Ansteuerungsarten gleichwertig sind.

Die Sparvariante mit zwei Thyristoren eignet sich nur bedingt für die Ansteuerung einer ohmschen Last. Das harte Auf- und Absteuern erfüllt die Grenzwerte der Oberschwingungsspannung 2.11.2 nicht. Einzig das sanfte Auf- und Absteuern erfüllen die Spannungs- und Stromnorm. Das Problem ist jedoch, dass die Phasen stark unterschiedlich belastet werden. Beim FFT können relative Unterschiede bei den Spannungen von bis zu 10% und bei den Strömen von bis zu 28% festgestellt werden.

Schlussendlich erkannte man, dass sich das sanfte Auf- und Absteuern am besten eignet um einen Widerstand anzusteuern. Dies Aufgrund der dünnen Seitenbänder bei den harmonischen Oberschwingungen, des hohen Leistungsfaktors und der kleinen Amplitude der auftretenden harmonischen Oberwellen.

6.2 Resultate der Ansteuerungsarten bei der ASM

Da im Voraus die Strommessungen vollzogen wurden, welche für ihre jeweilige Last Sinn ergeben, wurden nicht mit allen Ansteuerungsarten die ASM angesteuert. Für die Schwingungspaketsteuerung und das harte Auf- und Abfahren der Leistung ist keine Anwendungen für die Maschine bekannt. Deshalb verzichtete man auf die Messungen dieser Steuerungsarten.

Bei der Asynchronmaschine wurden zuerst die Strommessungen der Phasenanschnittsteuerung mit den bekannten Winkeln von 60° und 90° sowie das sanfte Auf- und Asteuern des Stromes, durchgeführt. Die Werte des Effektivstromes wurde wieder mit einem Faktor auf die 16 A hoch skaliert, um den maximalen erlaubten Stromstromwerte zu erhalten. So konnten die Grenzwerte der Oberschwingungsströme mit den dazugehörigen Normen 2.11 verglichen werden. Anders als bei dem Widerstand, erfüllen alle untersuchten Ansteuerungsarten die Grenzwerte der Normen. Deshalb konnte man in einem zweiten Messverfahren die Oberschwingungsspannungen untersuchen.

Bei der ASM handelt es sich wie auch beim Widerstand um ein 400 V- und nicht ein 230 V-System. Deshalb konnten die sub- und zwischenharmonischen Schwingungen der Messungen nicht mit den Normen 2.11 verglichen werden. Da jedoch die Schwingungspaketsteuerung und das harte Auf- und Absteuern der ASM nicht verwendet wird, schloss man daraus, dass die Ansteuerungsarten welche kritische Seitenbänder hervorruft, nicht mehr vorhanden sind.

Das FFT des Phasenanschnitt 60° zeigt bei allen drei Phasen, einen fast perfekten Sinus auf. Die harmonischen Oberschwingungen im Verhältnis zur Grundschwingung betragen deshalb nur maximal 1.5%. Sub- und Zwischenharmonische sind ebenfalls kein vorhanden. Dies erkennt man auch nach betrachten des Spannungssignals. Der Phasenanschnitt mit 90° ist für die Ansteuerung der ASM nicht geeignet, da die harmonischen Oberschwingungen die Grenzwerte der

Norm 2.11.2 nicht einhalten. Beim sanften Auf- und Absteuern sind harmonische Schwingungen zu erkennen. Sie halten jedoch die Grenzwerte ein. Zudem existieren sub- und zwischenharmonische Schwingungen. Im Vergleich zur Ansteuerung mit dem Phasenanschnitt von 60° sind die Verhältnisse zur Grundschwingung grösser.

Für den Leistungsfaktor verglich man nur noch das sanfte Auf- und Absteuern mit der Phasenanschnittsteuerung mit einem Winkel von 60° . Bei der ASM gilt, je näher der Leistungsfaktor bei 0 ist, desto niedriger sind die Ummagnetisierungs- und Eisenverluste. Anders als beim Faktor des Widerstandes, gibt es beim Leistungsfaktor der ASM grössere Unterschiede, wobei dieser zwischen dem sanften Auf- und Absteuern und Phasenanschnitt 60° 0.1208 beträgt. Das sanfte Auf- und Abfahren hat einen tieferen Leistungsfaktor als der Phasenanschnitt mit dem Winkel von 60° .

Wie auch bei der Widerstandsmessung wurde bei der ASM eine Sparvariante mit zwei Thyristoren untersucht. Sie hält jedoch die Grenzwerte der Oberschwingungsströme nicht ein. Die Variante wurde deshalb nicht mehr aufgezeigt.

Als Fazit für die verschiedenen Ansteuerungsarten erkannte man, dass sich das sanfte Auf- und Absteuern auch bei der ASM am besten eignet. Zwar zeigte das FFT des Phasenanschnittes mit 60° keine harmonischen Oberschwingungen, jedoch waren sie beim sanften Auf- und Absteuern in Rahmen der erlaubten Grenzwerte der Normen. Der Leistungsfaktor des sanften Auf- und Absteuern ist tiefer als der des Phasenanschnittes mit 60° und deshalb besser.

6.3 Vergleich der Messungen mit den Simulationen

Für den Vergleich der Messungen mit den Simulationen gab es grosse Abweichung zwischen den verschiedenen Werten der FFTs. Es stellte sich als schwierig heraus bei komplexeren Ansteuerungsarten wie das sanfe und harte Auf- und Absteuern, die gleichen Zeiten für die Steigung und das Halten auf maximaler Spannung zu erreichen. Ein zusätzliches Problem stellte der Thyristorsteller und die Spannungsverstärkung dar, da diese eine Verzögerung besassen. Zusätzlich werden in der Simulation die Bauteile als ideal angenommen wobei dies bei den Messungen nicht der Fall ist. Erste Einblicke in das Simulation-Tool Plecs und das Verständnis des Verhalten von verschiedenen Ansteuerungsarten konnten trotzdem gewonnen werden.

7 Schlusswort

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit war es, eine Kombination von zwei geläufigen Ansteuerungsverfahren zu entwickeln, welche störende Oberschwingungen minimiert. Anhand eines Laboraufbaus sollte die gefundene Steuerung mit den Grenzwerten der Normen geprüft werden. Die Ergebnisse der beiden Verfahren, Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung, konnten analytisch auf verlustbehaftete Oberwellen untersucht werden. Dabei wurde erkannt, dass je grösser der Winkel des Phasenanschnittes gewählt wird, desto grösser werden die Amplitudenwerte der harmonischen Oberschwingungen. Bei der Schwingungspaketsteuerung treten, bei kleinerem Duty Cycle, mehr Sub- und Zwischenharmonische auf. Mit Hilfe der Simulations-Tools, Matlab und Plecs, konnten die einphasige analytische Untersuchung, der beiden Steuerverfahren, ausgeführt und verifiziert werden. Es zeigte sich, dass beide Tools die gleichen Werte des Amplitudenspektrums erhalten haben.

Der dreiphasige Vergleich mit Plecs und dem Laboraufbau hat gezeigt, dass die Amplitudenspektren Ähnlichkeit miteinander haben. Vergleicht man jedoch die Werte der beiden Spektren, ist vor allem bei der Schwingungspaketsteuerung und beim harten Auf- und Absteuern eine grosse Differenz erkennbar. Der Grund dafür ist, dass sich die Steilheit des Auf- und Absteuern beim praktischen Aufbau anders verhält als bei der theoretischen Simulation.

Die Kombination der beiden Ansteuerungsverfahren wurde mit Plecs im ein- und dreiphasigen System aufgebaut. Mit dem Arduino und der selber geschriebenen Software, konnte sie beim Laboraufbau implementiert werden. Die Steilheit des Auf- und Absteuern, die Dauer der maximalen Spannung sowie die Anzahl der eingeschalteten Pakete des dreiphasigen Thyristorstellers können manuell im Programm eingestellt werden. Als Last wurde nicht nur eine ohmscher Verbraucher (Widerstand) untersucht, sondern auch ein ohmsch-induktiver (Asynchronmaschine). Es stellte sich heraus, dass das sanfte Auf- und Absteuern der Leistung das geeignetste Verfahren ist, um die beiden Lasten anzusteuern. Die Werte der Oberschwingungsströme und Oberschwingungsspannung halten die Grenzwerte der Normen ein. Auch der untersuchte Leistungsfaktor hat bei beiden Verfahren im Vergleich zu den anderen den besten Wert erhalten.

Beim Aufbau der Sparvarianten, mit Ansteuerung von zwei Thyristoren, wurde erkannt, dass die ASM die Grenzwerte der Oberschwingungsspannung nicht einhält. Beim Widerstand erfüllt sie grundsätzlich die Normen, jedoch werden die Phasen unterschiedlich stark belastet. Deshalb ist auch diese Verfahren nicht für die Ansteuerung geeignet.

Leider konnten, aus Zeitgründen, keine genaueren Erkenntnisse zu den Netzrückwirkung von sub- und zwischenharmonischen Oberwellen gefunden werden. Sie treten vor allem bei Steuerungsarten mit Schwingungspakete auf. Es wird jedoch vermutet, dass je näher die Seitenbänder an den jeweiligen Harmonischen sind, desto weniger störend sind sie für die elektrischen Geräte. Mit Hilfe eines selbstgebauten Thyristorstellers wäre es möglich, alle drei Phasen unterschiedlich anzusteuern. Damit könnte das Verhalten der Halbwellensteuerung im Laboraufbau vollzogen und untersucht werden.

Am Ende des Projektes kann durchaus eine positive Bilanz gezogen werden. Auch wenn einige Verfahren, wie zum Beispiel die Auswirkung der sub- und zwischenharmonischen der verschiedenen Ansteuerungsarten, nicht herausgefunden wurde. Das Projekt hat gezeigt, dass es jedoch möglich ist, mit einer Kombination von zwei Steuerungsverfahren störende Oberschwingungen zu vermeiden. Zudem konnten neue und wichtige Erkenntnisse des Simulationsprogramm Plecs realisiert werden.

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 16.08.2019

Literatur

- [1] A. Kamenka. (2019). OBERSCHWINGUNGEN KAPITEL 1, 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“, Windisch: Hochschule für Technik der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 2018.
- [3] R. Paschotta. (2018). Phasenanschnittsteuerung, Adresse: <https://www.energielexikon.info/phasenanschnittsteuerung.html> (besucht am 15. Apr. 2019).
- [4] W. S. (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, Berlin et. al, 1990.
- [6] DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2), „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte für Oberschwingungsströme“, Deutsche Norm, 2006.
- [7] CEI IEC 61000-2-2, „Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Enviroment“, International Standard, 2002.
- [8] DIN EN 61000-3-3, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-3: Grenzwerte Begrenzung von Spannungsänderungen“, Deutsche Norm, 2013.
- [9] EXP-TECH. (2019). Arduino Tutorial - Pulsweitenmodulation (PWM), Adresse: <https://www.exp-tech.de/blog/arduino-tutorial-pulsweitenmodulation-pwm> (besucht am 25. Juni 2019).
- [10] Elektronik - Kompendium(1). (2019). Passiver Tiefpass / Tiefpass-Filter, Adresse: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0206172.htm> (besucht am 6. Juni 2019).
- [11] Elektronik - Kompendium(2). (2019). Nichtinvertierender Verstärker, Adresse: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0210151.htm> (besucht am 15. Juni 2019).
- [12] Elektronik - Kompendium(3). (2019). Spannungsteiler / Spannungsteilerschaltung, Adresse: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/slt/0201111.htm> (besucht am 20. Juli 2019).
- [13] Christian Grieger. (2019). Spannungsmessung mit dem Arduino, Adresse: <http://elektro.turanis.de/html/prj084/index.html> (besucht am 4. Aug. 2019).
- [14] M. Bhardwaj. (2017). Software Phase Locked Loop Design Using C2000 Microcontrollers for Single Phase Grid Connected Inverter, Adresse: <http://www.ti.com/lit/an/sprabt3a/sprabt3a.pdf> (besucht am 4. Aug. 2019).
- [15] M. Wassmer, „Funktionsmuster eines Dreiphasigen PFC Gleichrichters“, Windisch: Hochschule für Technik der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), 2018.
- [16] O. Lang. (2009). Spannungsqualität, ein Durchblick, Adresse: https://www.sf-ag.com/sites/default/files/flyer/2_Lang_DEVICE_PQ_Messung.pdf (besucht am 7. Mai 2019).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundschwingung mit 3. Ordnung [1]	4
2.2	Grundschwingung mit 11. Ordnung [1]	4
2.3	Sub- und Zwischenharmonische mit einer Grundfrequenz von 50 Hz	4
2.4	Addition der verschiedenen Oberwellen [2]	5

2.5	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 135° [3]	7
2.6	Phasenanschnitt mit einem Winkel von 45° [3]	8
2.7	Schwingungspaketsteuerung 2/3 der Leistung [4]	8
2.8	Leistungsfaktor von Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerung	9
3.1	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°	15
3.2	Amplituden- und Phasenspektrum (a) 60° (b) 90°	16
3.3	Rekonstruiertes Signal (a) 60° (b) 90°	16
3.4	FFT der Matlabfunktion mit einem Winkel von (a) 60° (b) 90°	17
3.5	Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	17
3.6	Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	18
3.7	Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	18
3.8	Sanftes Hoch- und Runterfahren der Leistung	19
3.9	Hartes Hoch- und Runterfahren der Leistung	20
3.10	Eingangssignal mit Phasenanschnitt (a) 60° (b) 90°	21
3.11	Amplitudenspektrum (a) 60° (b) 90°	22
3.12	Schwingungspaket mit einem Duty Cycle (a) 0.5 (b) 0.8	23
3.13	Amplitudenspektrum mit einem Duty Cycle 0.5 von (a) 0 - 100 Hz (b) 0 - 1000 Hz	23
3.14	Amplitudenspektrum mit einem Duty Cycle 0.8 von (a) 0 Hz - 100 Hz (b) 0 Hz - 1000 Hz	24
3.15	Lineares absolutes Spektrum mit einem Duty Cycle von (a) 0.5 (b) 0.8	24
3.16	Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel 90°	25
3.17	dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 60° (a) Signal (b) FFT	25
3.18	dreiphasige Phasenanschnittsteuerung mit 90° (a) Signal (b) FFT	26
3.19	dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.5 (a) Signal (b) FFT .	27
3.20	dreiphasige Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.8 (a) Signal (b) FFT .	27
3.21	Einphasiges Hoch- und Runterfahren mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt eines Paketes	28
3.22	FTT des einphasigen Hoch- und Runterfahren mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 40 Hz - 170 Hz	28
3.23	Dreiphasiges Auf- und Absteuern mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt	29
3.24	FTT des dreiphasigen Hoch- und Runterfahren mit einem Duty Cycle von 0.5 (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz - 300 Hz	29
3.25	Zweiphasige Ansteuerung mit Last in Stern (a) Eingangssignal (b) Ausschnitt . .	30
3.26	FTT der zweiphasigen Ansteuerung (a) 0 - 2000 Hz (b) Ausschnitt 0 Hz -280 Hz	31
4.1	Laboraufbau mit Verstärkerschaltung und Spannungsteiler	32

4.2 Schema Verstärkerschaltung	34
4.3 Werte der Bauteile	34
4.4 Schema Laboraufbau mit einem dreiphasigen Widerstand in Stern geschaltet . .	34
4.5 Hartes Auf-und Absteuern Arduinocode	36
4.6 Blockdiagramm eines digitalen PI-Reglers	37
5.1 Messung mit Phasenanschnitt 60°	39
5.2 Phasenanschnitt 90°	40
5.3 Messung mit dem harten Auf- und Absteuern	41
5.4 Messung mit sanftem Auf- und Absteuern	42
5.5 Messung mit Phasenanschnitt 60°	43
5.6 Messung mit Phasenanschnitt 90°	44
5.7 Messung mit sanftem Auf- und Absteuern	45
5.8 Messung mit der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5 . .	46
5.9 Messung mit der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.8 . .	48
5.10 Messung mit Auf- und Absteuern	49
5.11 Messung mit sanftem Auf- und Absteuern	50
5.12 Messung mit Phasenanschnitt 60°	51
5.13 Messung mit Phasenanschnitt 90°	53
5.14 Messung mit sanftem Auf- und Absteuern	55
5.15 Strommessung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren . .	56
5.16 Messung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren	57
C.1 Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz	88
D.1 Phasenanschnittsteuerung mit 30° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	91
D.2 Phasenanschnittsteuerung mit 45° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	91
D.3 Phasenanschnittsteuerung mit 120° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	91
D.4 Schwingungspaket mit Duty Cycle 0.2 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	92
D.5 Schwingungspaket mit Duty Cycle 0.4 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	92
D.6 Phasenanschnitt mit 30° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	92
D.7 Phasenanschnitt mit 45° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	93

D.8 Phasenanschnitt mit 120° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum	93
D.9 Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.2 simuliert mit Plecs (a) Eingangs- signal (b) Amplitudenspektrum	93
D.10 Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.4 simuliert mit Plecs (a) Eingangs- signal (b) Amplitudenspektrum	94
D.11 Vergleich der Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel von 60°	94
D.12 Vergleich des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.5	94
D.13 Vergleich des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8	95
D.14 Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8	95
D.15 Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8	95
E.1 Messung mit Phasenanschnitt 60°	98
E.2 Messung mit Phasenanschnitt 90°	98
E.3 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5	99
E.4 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8	99
E.5 Messung mit Sanft Anlasser	100
E.6 Messung mit Phasenanschnitt 60° und zwei Thyristoren	101
E.7 Messung mit Phasenanschnitt 90° und zwei Thyristoren	101
E.8 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5 und zwei Thyristoren	102
E.9 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8 und zwei Thyristoren	102
E.10 Messung mit dem harten Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren	103
E.11 Messung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren	104
E.12 Messung mit Phasenanschnitt 60° und einem Thyristoren	105
E.13 Messung mit Phasenanschnitt 90° und einem Thyristoren	105
E.14 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5 und einem Thy- ristoren	106
E.15 Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8 und einem Thy- ristoren	106
E.16 Messung mit Auf- und Absteuern und einem Thyristoren	107
E.17 Messung mit dem langsam Auf- und Absteuern und einem Thyristoren	107
E.18 Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5	108
E.19 Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5	108
E.20 Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8	108

E.21 Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8	108
E.22 Vergleich Messung und Simulation mit hartem Auf- und Absteuern	109
E.23 Vergleich Messung und Simulation mit hartem Auf- und Absteuern	109
E.24 Vergleich Messung und Simulation mit sanftem Auf- und Absteuern	109
E.25 Vergleich Messung und Simulation mit sanftem Auf- und Absteuern	109

Tabellenverzeichnis

2.1 Oberschwingungsfrequenzen	3
2.2 Grenzwerte für Geräte der Klasse A	13
2.3 Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz	13
2.4 Erforderlichen Werte der subharmonischen Spannungen	14
4.1 Beschreibung der Nummern	33
5.1 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 60°	40
5.2 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 90°	40
5.3 Amplitudenwerte bei verschiedenen Frequenzen beim hartem Auf- und Absteuern	41
5.4 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen beim sanftem Auf- und Absteuern	42
5.5 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 60°	43
5.6 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei Phasenanschnitt 90°	44
5.7 Amplitudenwerte bei den harmonischen Oberschwingungen bei sanftem Auf- und Absteuern	45
5.8 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei der Schwingungspaketsteuerung mit einem Duty Cycle von 0.5	47
5.9 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Schwingungspaket 80%	48
5.10 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei hartes Auf- und Absteuern	49
5.11 Amplitudenwerte bei der Frequenzen beim sanften Auf- und Absteuern	50
5.12 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Phasenanschnitt 60°	52
5.13 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei Phasenanschnitt 90°	54
5.14 Amplitudenwerte bei der Frequenzen bei sanftem Auf- und Absteuern	55
5.15 Amplitudenwerte bei der Strommessung mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern	57

5.16 Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern	58
5.17 Leistungsfaktor mit verschiedenen Ansteuerungsverfahren bei der ASM und dem Widerstand	59
C.1 Grenzwerte für Geräte der Klasse A	86
C.2 Beobachtungsdauer für die Prüfung	87
C.3 Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz	89
C.4 Erforderlichen Werte der subharmonischen Spannungen	90
D.1 Vergleich der Werte des Phasenanschnittes mit 60°	96
D.2 Vergleich der Werte des Phasenanschnittes mit 90°	96
D.3 Vergleich der Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5	97
D.4 Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5	97
D.5 Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.8	97
D.6 Vergleich der Werte des des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.8	97
E.1 Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei hartem Auf- und Absteuern	103
E.2 Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern	104

A Projektvereinbarung



Fachhochschule
Nordwestschweiz

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnologie

Projektarbeit P6: für die Herren Nando Spiegel und Bastian van Dijke

NETZRÜCKWIRKUNGEN VON THYRISTORSTELLERN MIT OHMSCHER LAST BEI VERSCHIEDENEN STEUERVERFAHREN

Auftraggeber: intern

Betreuung: Felix Jenni

Experte: wird bekannt gegeben

1. Einleitung

Ein- und dreiphasige Thyristorsteller werden seit vielen Jahrzehnten für verschiedenste Anwendungen eingesetzt. Bei ohmschen Lasten sind dem Betrieb mit Phasenanschnitt-Steuerung von den Netzbetreibern Grenzen gesetzt, wegen der dabei auftretenden Harmonischen (Vielfache der Netzfrequenz). Deshalb wird in diesen Fällen auf Schwingungspaket-Steuerung ausgewichen. Dabei wird die Leistung während mehrerer Netzperioden voll bezogen und anschliessend wieder weggeschaltet. Dieses harte Zu- und Wegschalten der Last zum Netz erzeugt neben Harmonischen der Netzfrequenz auch Subharmonische (Bruchteile der Netzfrequenz).

Grundsätzliche ist eine dritte Variante der Steuerung denkbar: Ein sanftes Hochfahren mit Phasenanschnitt auf volle Leistung, während einer Anzahl Pakete volle Leistung und dann wieder sanft auf null. Dabei interessiert, mit welchem Verfahren welche Harmonischen auftreten und welche Leistungen in Bezug auf die Wirkleistung auftreten (Blindleistung, Verzerrungsblindleistung, Leistungsfaktor, ...). Zusammengefasst: Welches Verfahren, welche Kombination von Verfahren ergibt den grössten Leistungsfaktor?

2. Aufgabenstellung

- a) Informieren Sie sich über die gängigen Steuerverfahren für ein- und dreiphasige Wechselspannungssteller.
- b) Bestimmen Sie analytisch die Strom-Harmonischen und den Leistungsfaktor in Funktion des Zündwinkels für Phasenanschnitt-Steuerung (ein- und dreiphasig...).
- c) Bestimmen Sie analytisch die Strom-Harmonischen und den Leistungsfaktor in Funktion des Ein-Ausschalt-Verhältnisses für Schwingungspaket-Steuerung.
Was ändert, wenn nicht darauf geachtet wird, dass die Ströme DC-frei werden?
- d) Überprüfen Sie die Resultate mit Plecs-Simulationen und Messungen an einem Laboraufbau.
- e) Untersuchen Sie ein Verfahren mit sanftem Hoch-und Runterfahren der Leistung.
Wie muss die Rampensteinheit in Bezug auf die Schwingungspacket-Periode für den bestmöglichen Leistungsfaktor gewählt werden?
- f) Simulieren und implementieren Sie die gefundene Lösung und verifizieren Sie das Ganze messtechnisch.

- g) Klären Sie, ob sich mit dem gefundenen Verfahren die Netzvorschriften einhalten lassen.
- h) Kaufen Sie nach Absprache mit dem Betreuer einen ein- und/oder dreiphasige Steller und realisieren Sie das gefundene optimale Steuerverfahren auf einem UniPi-Steuergerät.
Bauen Sie das Ganze so auf, dass es «im Feld» betrieben werden kann.

3. Allgemeines

Die Arbeit ist ausführlich in einem Bericht zu dokumentieren. Dieser ist so zu verfassen, dass sämtliche eigenen Arbeiten beschrieben werden. Was von einer anderen Stelle übernommen wird, soll nicht nochmals dokumentiert, sondern mit Quellenangabe beigefügt werden. Eine Übersicht der Arbeit (mit den erreichten Resultaten) ist auf einem "Poster" der Grösse A1 abzugeben. Ebenso soll eine Zusammenfassung (abstract) im HTML-Format erstellt werden, die zur Einbindung auf einer Internet-Seite geeignet ist. Die erreichten Resultate sind anlässlich einer mündlichen Präsentation / Verteidigung an der FHNW vorzustellen.

Der Bericht, sowie erstellte Software, Simulationen usw., sollen auch in elektronischer Form abgegeben werden. Ebenso sollen Datenblätter verwendeter Bauteile, soweit vorhanden, in elektronischer Form abgegeben werden.

Im Weiteren gilt der 'Leitfaden für die Abfassung von Semester- und Diplomarbeiten'.

Beginn:

Montag, 18. Februar 2019; 08:00

Abgabe:

Freitag, 16. August 2019; 12:00

Präsentation:

Woche 36 / 37

(Der genaue Termin wird später bekannt gegeben.)

Windisch, den 13.08.2019; Felix Jenni

B Code

B.1 Matlab Berechnungen

Leistungsfaktor

```

1 clc, clear all
2 %Leistungsfaktor
3 %Phasenanschnitt
4 clc, clear all, close all hidden
5 alpha= linspace(0, 180, 180);
6 alphal= deg2rad(alpha);
7 ProzentAlpha= alphal/(pi)*100;
8
9 lambda_prov= sqrt(1-alpha1/pi+1/(2*pi)*sin(2*alpha1));
10 %lambda_p= real(lambda_prov);
11 VP = 1-alpha1/pi+1/(2*pi)*sin(2*alpha1);
12 hold on
13 subplot(1,2,1)
14 plot(VP,lambda_prov)
15 %plot(lambda_p)
16 axis([0 1 0 1])
17 grid on
18 %ax1= gca;
19 %ax1_pos=ax1.Position;
20 %ax2= axes('Position', ax1_pos, 'XAxisLocation', 'top', 'Color', 'none')
21 title('Phasenanschnitt')
22 xlabel('Einschaltverhaeltnis [P_{\alpha}/P_{0}]')
23 ylabel('Leistungsfaktor [\lambda]')
24
25 % Schwingungspaketsteuerung
26 a= linspace(0.1, 1, 10 );
27
28 lambda_s= sqrt(a);
29 subplot(1,2,2)
30 plot(a,lambda_s)
31 grid on
32 axis([0 1 0 1])
33 title('Schwingungspaket')
34 xlabel('Einschltverhaeltnis [a]')
35 ylabel('Leistungsfaktor [\lambda]')
36
37 %Differenz ausprobieren
38 %x= fsolve(lambda_s lambda_p)

```

Phasenanschnitt

```

1 %FFT Phasenanschnitt mit der Matlabfunktion
2 clear all,close all,clc
3 % Grundeinstellung der Berechnung
4 N=10000;
5 t=(1:N)/N;
6 f0=50;
7 figure;
8 window=zeros(1,N);
9 % Winkel des Phasenanschnittes eingeben
10 alpha=pi/2;
11 % Berechnung der Funktion
12 show=100;
13 window((floor(alpha/(2*pi)*N)+1):N/2)=1;
14 window(floor((alpha+(pi))/(2*pi)*N):N)=1;

```

```

15 y = sin(2*pi*t*1).*window;
16 Y=fft(y);
17 % Anzeigen des Amplitudenspektrum
18 ax=subplot(2,1,1);
19 stem((0:(length(Y)/2/show)-11).*f0,abs(Y(1:(end/2/show)-10))./(N/2))
20 ax.Title.String='Amplitudenspektrum'
21 grid on
22 xlabel('Frequenz [Hz]')
23 ylabel('Amplitude')
24 % Anzeigen des Phasenspektrum
25 % ax=subplot(3,1,2)
26 % for-Schleife Bestimmung die 0-Werte des Phasenspektrum
27 % for i=1:length(Y)
28 % if(abs(Y(i))<1)
29 % Y(i)=0;
30 % end
31 % end
32 % stem((0:(length(Y)/2/show)-11).*f0,angle(Y(1:(end/2/show)-10)))
33 % ax.Title.String='Phasenspektrum'
34 % grid on
35 % hold on
36 % Anzeigen der Funktion
37 subplot(2,1,2)
38 plot(t.*(2),y)
39 title('Funktion')
40 xlabel('Periodendauer')
41 ylabel('Amplitude')
42 grid on

```

Schwingungspaket

```

1 % Schwingungspaketsteuerung
2 clear all, close all, clc
3 syms x n;
4 assume(n,'integer')
5 % Werte des duty cycle eingeben
6 duty_cycle = 0.5;
7 % Grundeinstellungen
8 laenge_APS = 100;
9 T=5*20*pi;
10 w0=((2*pi)/T);
11 packet_ausgeschaltet=10-(duty_cycle*10);
12 Periden_laenge = 20*pi;
13 ug = 0;
14 og = 5*20*pi;
15 packetkomplet = 2*pi*packet_ausgeschaltet;
16 % Berechnung der Schwingungspaket-Funktion
17 if packetkomplet== 0
18     f(x) = sin(x)
19 elseif packetkomplet > 0
20     f(x) = piecewise(x < packetkomplet, 0,
21                         packetkomplet< x <Periden_laenge, sin(x),
22                         x < packetkomplet+1*Periden_laenge,
23                         0, packetkomplet+1*Periden_laenge< x <Periden_laenge+1*Periden_laenge, sin(x),
24                         x < packetkomplet+2*Periden_laenge, 0,
25                         packetkomplet+2*Periden_laenge< x <Periden_laenge+2*Periden_laenge, sin(x),
26                         x < packetkomplet+3*Periden_laenge, 0,
27                         packetkomplet+3*Periden_laenge< x <Periden_laenge+3*Periden_laenge, sin(x),
28                         x < packetkomplet+4*Periden_laenge, 0,
29                         packetkomplet+4*Periden_laenge< x <Periden_laenge+4*Periden_laenge, sin(x));
30 end
31 % Anzeigen der Funktion

```

```

32 figure
33 limits = [0 315];
34 fplot(f, limits)
35 grid on
36 title('Funktion')
37 % Berechnung des Fourier-koefizienten a0
38 a_0=2/T*(int(f(x),x,ug,og));
39 a_0=simplify(a_0);
40 % Berechnung des Fourier-koefizienten b(n)
41 b(n)=2/T*(int(f(x)*sin(w0*n*x),x,ug,og));
42 b(n)=simplify(b(n));
43 % Berechnung der Fourier-koefizienten a(n)
44 a(n)=2/T*(int(f(x)*cos(n*w0*x),x,ug,og));
45 a(n)=simplify(a(n));
46 % Berechnung und Anzeige des Amplitudenspektrum von 0 - 100 Hz
47 figure
48 subplot(1,2,1)
49 c=stem(0,abs(a_0));
50 set(c,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
51 for n=1:laengeAPS
52     A(n)=sqrt((b(n))^2+(a(n))^2);
53     hold on
54     d=stem(n,A(n),'o');
55     set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
56 end
57 title('Absolute, linear 0 - 100 Hz')
58 xlabel('Frequenz [Hz]')
59 axis ([0 laengeAPS 0 1])
60 grid on
61 % Berechnung und Anzeige des Amplitudenspektrum von 0 - 1000 Hz
62 subplot(1,2,2)
63 c=stem(0,abs(a_0));
64 set(c,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
65 for n=1:1000
66     A(n)=sqrt((b(n))^2+(a(n))^2);
67     hold on
68     d=stem(n,A(n),'o');
69     set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
70 end
71 axis ([0 1000 0 1])
72 xlabel('Frequenz [Hz]')
73 title('Absolute, linear 0 - 1000 Hz')
74 grid on
75 % Berechnung und Anzeige des Absoluten logarithmzus in db
76 figure
77 c=stem(0,abs(a_0));
78 set(c,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
79 for n=5:5:laengeAPS
80     A(n) = sqrt((b(n))^2+(a(n))^2);
81     B(n)= (20*log10(A(n)));
82     if B(n)==-Inf
83         B(n)=-100;
84     end
85     hold on
86     C(n)=n*0-60;
87     hold on
88     d=stem(n,C(n),'o');
89     v=stem(n,B(n),'o');
90     set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',0.00001);
91     set(v,'Color','white','MarkerSize',0.1,'LineWidth',0.00001);
92     grid on
93 end

```

```

94 title('Absolut logarithmic')
95 xlabel('Frequenz [Hz]')
96 axis([0 100 -60 0])
97 ylabel('Dezibel [dB]')
98 grid on

```

Fourieranalyse von Hand

```

1 % Fourieranalyse von Hand
2 clear all, close all, clc
3 syms x n pi;
4 assume(n,'integer')
5 % Grundeinstellungen
6 laenge_APS = 40;
7 T=2*pi;
8 w0=(2*pi)/T;
9 ug = 0;
10 og = 2*pi;
11 % Winkel eingeben
12 winkel=pi/3;
13 % Berechnung des Phasenanschnittes
14 if winkel== 0
15     f(x) = sin(x)
16 elseif winkel > 0
17     f(x) = piecewise(x<winkel, 0, winkel<x<pi,
18                         sin(x), pi<x<pi+winkel, 0, pi+winkel<x<2*pi, sin(x), x>2*pi, 0 );
19 end
20 % Anzeigen des Phasenanschnittes
21 figure
22 limits = [0 7];
23 fplot(f, limits)
24 grid on
25 title('Funktion')
26 % Berechnung des Fourier-koefizienten a0
27 a_0=1/(2*pi)*(int(f(x),x,ug,og));
28 a_0=simplify(a_0)
29 % Berechnung des Fourier-koefizienten b(n)
30 b(n)=2/T*(int(f(x)*sin(w0*n*x),x,ug,og));
31 b(n)=simplify(b(n))
32 % Berechnung der Fourier-koefizienten a(n)
33 a(n)=2/T*(int(f(x)*cos(n*w0*x),x,ug,og));
34 a(n)=simplify(a(n))
35 % Anzeigen und Berechnen des Amplitudenspektrum
36 figure
37 subplot(1,2,1)
38 c=stem(0,abs(a_0));
39 set(c,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
40 for n=1:laenge_APS
41     A(n)=sqrt((b(n))^2+(a(n))^2);
42 end
43 d=stem(A,'o');
44 set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
45 title('Amplitudenspektrum')
46 grid on
47 % Anzeigen und Berechnen des Phasenspektrum
48 subplot(1,2,2)
49 for n=1:laenge_APS
50     if(mod(n,2) == 0)
51         P(n) = 0;
52     else
53         P(n)=atan2(a(n),b(n));
54     end

```

```

55 end
56 d=stem(P,'o');
57 set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
58 title('Phasenspektrum')
59 grid on
60 % Berechnung des Rekonstruierten Signals mit Hilfe des Amplituden- und
61 % Phasenspektrums
62 sym x
63 buff(x) = 0 * x;
64 for n=1:1:laenge_APS
65     buff(x) = buff(x) + double(A(n)) * sin(n*w0*x + double(P(n)));
66 end
67 f_r(x) = buff(x);
68 f_r(x) = simplify(f_r);
69 % Anzeigen des Rekonstruierten Signals
70 figure;
71 fplot(f_r);
72 grid on;
73 axis([0 7 -1 1])

```

Trapez Funktion

```

1 % Trapez-funktion
2 clear all, close all, clc
3 syms x n;
4 assume(n,'integer')
5 % Werte Eingeben
6 % Wie lange der Wert 0 am Anfang und am Ende sein soll
7 anfang=200;
8 % Wie lange es hinauffahren soll
9 gesauffahren=1050;
10 % Wie lange es den Wert 1 haben soll
11 halten=500;
12 % Grundeinstellungen der Berechnungen
13 auffahren=anfang+gesauffahren;
14 runterfahren=auffahren;
15 ende=2*anfang+halten+2*gesauffahren;
16 ug = 0;
17 T = ende;
18 og=T;
19 w0=(2*pi)/T;
20 laenge_APS = 40;
21 % Berechnung der Trapez-Funktion
22 offset=1/(auffahren-anfang)*anfang;
23 f2_1(x)=1/(auffahren-anfang)*x-offset;
24 f2(x) = piecewise(x<anfang,0, anfang<x<auffahren, f2_1(x),
25 auffahren<x<auffahren+halten,
26 1,auffahren+halten<x<auffahren+halten+gesauffahren,
27 -f2_1(x)+(f2_1(auffahren+halten))+1,
28 auffahren+halten+gesauffahren<x<ende,0);
29 % Berechnung des Fourier-koefizienten a0
30 a_0=2/T*(int(f2(x),x,ug,og));
31 a_0=simplify(a_0)
32 % Berechnung des Fourier-koefizienten b(n)
33 b(n)=2/T*(int(f2(x)*sin(w0*n*x),x,ug,og));
34 b(n)=simplify(b(n))
35 % Berechnung der Fourier-koefizienten a(n)
36 a(n)=2/T*(int(f2(x)*cos(n*w0*x),x,ug,og));
37 a(n)=simplify(a(n))
38 % Anzeige der Trapez-Funktion
39 figure
40 subplot(1,2,1)

```

```

41 limits = [0 3000];
42 fplot(f2, limits)
43 axis([0 3000 0 3])
44 grid on
45 title('Trapez-Funktion')
46 xlabel('Zeit [ms]')
47 ylabel('Amplitude')
48 % Anzeige des Amplitudenspektrum
49 subplot(1,2,2)
50 c=stem(50,abs(a_0/2));
51 hold on
52 set(c,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
53 for n=1:laenge_APS
54     A(n)=sqrt((b(n))^2+(a(n))^2);
55     hold on
56     d=stem(n+50,A(n),'o');
57     set(d,'Color','blue','MarkerSize',0.1,'LineWidth',2);
58 end
59 title('Amplitudenspektrum')
60 grid on
61 xlabel('Frequenz [Hz]')
62 ylabel('Amplitude')
63 grid on

```

Leistungsfaktor der Messungen

```

1 %Leistungsfaktor Widerstand mit Phasenanschnitt 60
2 clc,clear all, close all
3 subplot(2,1,1);      %Herauslesen und plotten Spannung
4 N= csvread('Test_Leistungsfaktor_Widerstand_Phas60.csv');
5 plot(N(:,1),N(:,2))
6 title('Spannungssignal')
7 xlabel('Zeit [s]')
8 ylabel('Spannung [V]')
9 hold on
10 grid on
11 box on
12 axis([0 0.2 -400 400])
13
14 subplot(2,1,2); %Herauslesen und plotten Strom
15 hold on
16 grid on
17 box on
18 plot(N(:,1),N(:,3)+0.0804)  %Offset eliminieren
19 title('Stromsignal')
20 xlabel('Zeit [s]')
21 ylabel('Strom [A]')
22 axis([0 0.2 -2 2])
23
24 U= N(:,2); %U(t) Werte herauslesen
25 I = (N(:,3)+0.0804);    %I(t) Werte herauslesen und Offset eliminieren
26 P= U.*I;      %Wirkleistung berechnen
27 P0 = mean(P); %Mittelwert der Wirkleistung
28
29 Ueff= sqrt(mean(U.^2)); %Effektivspannung berechnen
30 Ieff= sqrt(mean(I.^2));    %Effektivspannung berechnen
31
32 lambda= P0/(Ieff*Ueff)  %Leistungsfaktor berechnen & ausgeben
33 Wirkleistung= P0    %Wirkleistung ausgeben
34 Scheinleistung= mean(Ueff*Ieff)  %Scheinleistung berechnen & ausgeben
35 Spannung= Ueff    %Effektivspannung ausgeben
36 Strom= Ieff %Effektivstrom ausgeben

```

Spannungssignale mit FFT

```

1 %Berechnung FFT Spannungen Phasenanschnitt 60 Grad
2 clc,clear all, close all
3 subplot(2,1,1);
4 N= csvread('Phasenanschnitt_S_60grad_kurz.csv');
5 plot(N(:,1),N(:,2),N(:,1),N(:,3),N(:,1),N(:,4))
6 title('Spannungssignal')
7 xlabel('Zeit [s]')
8 ylabel('Spannung [V]')
9 axis([0 0.2 -350 350])
10
11 subplot(2,1,2);
12 hold on
13 box on
14 %Berechnung vom FFT
15 X=[N(:,2)' N(:,2)'];
16 T= mean(diff(N(:,1)));
17 Fs = 1/T;
18 L = numel(X);
19 LL=1:L;
20 window=1;
21 axis([0 2e3 0 400])
22 Y = fft(X.*window);
23 P2 = abs(Y/L);
24 P1 = P2(1:L/2+1);
25 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
26 f = Fs*(0:(L/2))/L;
27 plot(f,P1)
28 FFT1= plot(f,P1);
29 FFT1.Color = 'blue';
30 title('FFT vom Spannungssignal Phase 1')
31 xlabel('Frequenz [Hz]')
32 ylabel('Amplitude')
```

Stromsignale mit FFT

```

1 %Phasenanschnitt 60 Grad
2 clc,clear all, close all hidden
3 subplot(4,1,1);
4 N= csvread('Phasenanschnitt_Widerstand_S_Stroeme_60grad_lang.csv');
5 plot(N(:,1),N(:,2),N(:,1),N(:,3),N(:,1),N(:,4))
6 title('Stromsignal')
7 xlabel('Zeit [s]')
8 ylabel('Strom [A]')
9 axis([-0.05 0.02 -2.5 2.5])
10 hold on
11 grid on
12 box on
13
14 subplot(4,1,2);
15 hold on
16 box on
17 grid on
18 % Berechnung FFT Originalstrom
19 X=[N(:,2)' N(:,2)'];
20 T= mean(diff(N(:,1)));
21 Fs = 1/T;
22 L = numel(X);
23 LL=1:L;
24 window=1;
25 Y = fft(X.*window);
```

```

26 P2 = abs(Y/L);
27 P1 = P2(1:L/2+1);
28 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
29 f = Fs*(0:(L/2))/L;
30 FFT2= plot(f,P1);
31 FFT2.Color = 'blue';
32 title('FFT vom Stromsignal Phase 1')
33 xlabel('Frequenz [Hz]')
34 ylabel('Amplitude')
35 axis([0 1e3 0 2])
36
37 subplot(4,1,3)
38 % Hochrechnen Stroeme auf 16A
39 hold on
40 grid on
41 box on
42 plot(N(:,1),N(:,2)*(11.14541277),N(:,1),
43 N(:,3)*(11.14541277),N(:,1),N(:,4)*(11.14541277));
44 title('Stromsignal')
45 xlabel('Zeit [s]')
46 ylabel('Strom [A]')
47 axis([-0.05 0.02 -30 30])
48
49 subplot(4,1,4)
50 % Berechnung FFT der hochgerechneten Stroeme
51 hold on
52 grid on
53 box on
54 X=[N(:,2)' N(:,2)'];
55 X1=[X*(11.14541277)];
56 T= mean(diff(N(:,1)));
57 Fs = 1/T;
58 L = numel(X1);
59 LL=1:1:L;
60 window=1;
61 Y = fft(X1.*window);
62 P2 = abs(Y/L);
63 P1 = P2(1:L/2+1);
64 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
65 f = Fs*(0:(L/2))/L;
66 FFT2= plot(f,P1);
67 FFT2.Color = 'blue';
68 title('FFT vom Stromsignal Phase 1')
69 xlabel('Frequenz [Hz]')
70 ylabel('Amplitude')
71 axis([0 1e3 0 25])

```

B.2 Arduino-Programm

Phasenanschnittsteuerung

```

1 const int Switch_PO = 3; // Output fuer den EIN- & AUSSCHALTER
2 const int Controll_P = 2; // Output fuer Steuersignal
3 const int Switch_PI = 5; // Input fuer den EIN- & AUSSCHALTER
4 int buttonState = 0; // Zustand Schalter auf 0
5
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 analogWrite(Controll_P, 127); //Zuendwinkel ausgeben
15 }
```

Schwingungspaketsteuerung

```

1 const int Switch_PO = 3; // Output fuer den EIN- & AUSSCHALTER
2 const int Controll_P = 2; // Output fuer Steuersignal
3 const int Switch_PI = 5; // Input fuer den EIN- & 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     digitalWrite(Controll_P, HIGH); // Auf High schalten um
        Zuendwinkel von 0 Grad zu erreichen (Volle Leistung)
17     delay(800); // Warten waehrend volle Leistung
18     digitalWrite(Controll_P, LOW); // Auf Low schalten um
        Zuendwinkel von 180 Grad zu erreichen (Keine Leistung)
19     delay(200); // Genug Zeit zwischen den Paketen weil sonst wird
        eine Spannung von 0V nicht erreicht
20 }
21 }
```

Hartes Auf- und Absteuern

```

1 const int Switch_PO = 3; // Output fuer den EIN- & AUSSCHALTER
2 const int Controll_P = 2; // Output fuer Steuersignal
3 const int Switch_PI = 5; // Input fuer den EIN- & AUSSCHALTER
4
5 int buttonState = 0; // Zustand Schalter auf 0
6 int anzahl_Schwingungspakete = 5; // Anzahl Schwingungspakete
7 int Geschwindigkeit = 5; // Steilheit des Hoch- und Runterfahrens
8
9 void setup() {
10 pinMode (Switch_PO, OUTPUT); // Schalter auf Output
11 pinMode (Controll_P, OUTPUT); // PWM auf Output
12 pinMode (Switch_PI, INPUT_PULLUP); // Schalter Eingang
13 }
14
15 void loop() {
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(Geschwindigkeit); // Geschwindigkeit des Hochfahrens
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(Geschwindigkeit); // Geschwindigkeit des Runterfahrens
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 }
```

Sanftes Auf- und Absteuern

```

1 const int Switch_PO = 3; // Output fuer den EIN- & AUSSCHALTER
2 const int Controll_P = 2; // Output fuer Steuersignal
3 const int Switch_PI = 5; // Input fuer den EIN- & AUSSCHALTER
4 int buttonState = 0; // Zustand Schalter auf 0
5 int Geschwindigkeit = 75; // Steilheit des Hoch- und Runterfahrens
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);
15     for (int i = 0; i < 255; i++) { // Hochfahren mit PWM
16         analogWrite(Controll_P, i); // Die Variable wird auf den
17             Steuersignalausgang geschrieben
18         delay(Geschwindigkeit); // Geschwindigkeit des Hochfahrens
19     }
20     delay(500); // Warten waehrend volle Leistung
21     for (int i = 255; i > 0; i--) { // Runterfahren mit PWM
22         analogWrite(Controll_P, i); // Die Variable wird auf den
23             Steuersignalausgang geschrieben
24         delay(Geschwindigkeit); // Geschwindigkeit des Runterfahrens
25     }
26     delay(2000); // Warten waehrend keiner Leistung
27 }
```

Drehzahlregelung

```

1 #define PIN_MESS A6 // Setzen Messpin
2 #define REF_VOLTAGE 5.0 // Setzen Referenzspannung
3 #define PIN_STEPS 1024.0 // Setzen ADC
4 const int Switch_PO = 3; // Output fuer den EIN- & AUSSCHALTER
5 const int Controll_P = 2; // Output fuer Steuersignal
6 const int Switch_PI = 5; // Input fuer den EIN- & AUSSCHALTER
7 int buttonState = 0; // Zustand Schalter auf 0
8 float vout = 0.0, vin = 0.0; // Definieren Ein- und Ausgangsspannung
9 float R1 = 611000.0; // resistance R1 (= 611 KOhm)
10 float R2 = 56000.0; // resistance R2 (= 56 KOhm)
11 float rawValue = 0; // Definieren ADC Wert
12 float Vsoll = 40; // Sollspannung vorgeben
13 float Vaus = Vsoll / 60 * 255; // Sollspannung umrechnen
14 float Vdiff = 0.0; // Definieren Differenzspannung
15 float Vdiff_255 = Vdiff / 60 * 255; // Differenzspannung umrechnen
16 float Vdiff_1 = 0.0; // Definieren Differenzspannung von letztem
17 Durchgang
```

```

17 float Vaus_1 = 0.0; // Definieren Ausgangsspannung von letztem
   Durchgang
18 float Ti = 0.0003453873519; // Zeit PI-Regler
19 float Kp = 0.1; // Proportional Faktor PI-Regler
20 float Ki = 0.01; // Integral Faktor PI-Regler
21 float B_0 = Kp + Ki * Ti / 2; // Definieren B0
22 float B_1 = -Kp + Ki * Ti / 2; // Definieren B1
23 float Vausgabe = Vausdifferenz / 60 * 255; // Definieren endgueltige
   Ausgangsspannung
24 float Vausdifferenz = 0; // Definieren endgueltige Differenzspannung
25 float Vauslog = Vaus / 255 * 60; // Umrechnen Ausgangsspannung
26
27 void setup() {
28   pinMode (Switch_PO, OUTPUT); // Schalter auf Output
29   pinMode (Controll_P, OUTPUT); // PWM auf Output
30   pinMode (Switch_PI, INPUT_PULLUP); // Schalter Eingang
31   Serial.begin(9600); // Schreibrate
32   pinMode(PIN_MESS, INPUT); // Messung auf Input
33 }
34
35 void loop() {
36   buttonState =! digitalRead(Switch_PI); // Da Pullup wird das
      Signal negiert
37   if(buttonState == HIGH){ // if-Schleife falls Zustand Schalter auf
      EIN
38     rawValue = analogRead(PIN_MESS); // Auslesen ADC
39     vout = (rawValue * REF_VOLTAGE) / PIN_STEPS; // Umrechnen auf 5V
40     vin = vout / (R2 / (R1 + R2)); // Umrechnen auf 60V
41
42     Vdiff = Vsoll - vin; // Berechnen Differenzspannung
43     Vaus = Vaus_1 + B_0 * Vdiff + B_1 * Vdiff_1; // Berechnen
      Ausgangsspannung mit Filter
44     Vausdifferenz = Vauslog + Vdiff_255; // Berechnen
      Differenzspannung und Ausgangsspannung
45
46     if (Vausgabe > 255) { // Begrenzung auf 255 Werte
47       Vausgabe = 255;
48     }
49     if (Vausgabe < 0) { // Begrenzung negativer Bereich
50       Vausgabe = 0;
51     }
52     analogWrite(Controll_P, Vausgabe); // Ausgeben von
      Ausgangsspannung
53     Vdiff_1 = Vdiff; // Differenzspannung in Differenzspannung von
      letztem Durchgang laden
54     Vaus_1 = Vausgabe; // Ausgangsspannung in Ausgangsspannung von
      letztem Durchgang laden
55   }
56   delay(10); // Abtastrate definieren
57 }
```

C Zusammenfassung der Normen

C.0.1 EN 61000-3-2 Grenzwerte für Oberschwingungsströme

Diese Norm gilt für elektrische und elektronische Geräte (Betriebsmittel und Einrichtungen) bis zu einem Eingangsstrom von 16 A je Leiter. Ausserdem ist der Anschluss des Gerätes an das öffentliche Niederspannungsverteilnetz vorgesehen. Unter dem Begriff "Elektrische Einrichtung" versteht man eine Anlage, welches aus einem oder mehreren voneinander unabhängigen Geräten besteht. Sie bilden eine elektrische Einrichtung, wenn nur durch deren Zusammenwirken der bestimmungsgemäße Zweck der Einrichtung erzielt werden kann. Ein Beispiel für eine elektrische Einrichtung ist, der Treppenlichtautomat zusammen mit den dazugehörigen Leuchten. Nur der Automat ohne Beleuchtung erfüllt den technischen Zweck der Bezeichnung 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. Die Norm definiert die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangsstromes bis zur 40. Harmonischen, die durch ein Gerät hervorgerufen werden können, dass 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. Die nicht-sinusförmige und somit oberschwingungsbehaftete Stromentnahme verursacht an der Netzimpedanz 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 $\pm 1.5^\circ$
- $U_{peak} = 1.4V - 1.42V$ U_{eff} und zwischen 87° und 93° muss 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 beim vorliegenden 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 der Vollständigkeit halber aufgelistet.

Klasse B:

- tragbare Elektrowerkzeuge
- Lichtbogenschweisseinrichtungen, 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 C.1: Grenzwerte für Geräte der Klasse A

Ein weiterer wichtiger Wert ist die jeweilige Beobachtungsdauer der Endgeräte. Es sind hier verschiedene Arten von Geräteverhalten definiert und dabei die Beobachtungsdauer bestimmt. Dies sieht man in der folgenden Tabelle C.2 [6].

C.0.2 EN 61000-3-3 Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen

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, können so begrenzt werden. Falls Geräte und Einrichtungen diese

Art des Geräteveraltens	Beobachtungsdauer
quasi-stationär	T_{obs} von ausreichender Dauer, um die Anforderungen zur Wiederholpräzision einzuhalten
kurzer Zyklus ($T_{cycle} \leq 2.5\text{min}$)	$T_{obs} \geq 10$ Zyklen (Bezugsverfahren) oder T_{obs} von ausreichender Dauer oder Synchronisation, um die Anforderungen zur Wiederholpräzision einzuhalten ^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 C.2: Beobachtungsdauer für die Prüfung

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 in Abbildung C.1 als Widerstand R_A in Serie mit einer Spule jX_A dargestellt und entspricht den folgenden Werten:

- G Spannungsquelle
M Messeinrichtung
S Prüfungsspannungsquelle, bestehend aus dem Spannungsgenerator G und der Bezugsimpedanz Z mit den Elementen
 $R_A = 0.24\Omega$ $jX_A = 0.15\Omega$ bei 50 Hz
 $R_N = 0.16\Omega$ $jX_A = 0.10\Omega$ bei 50 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, zum Beispiel Strommesser, Spannungszange oder einem Flickermeter (M).

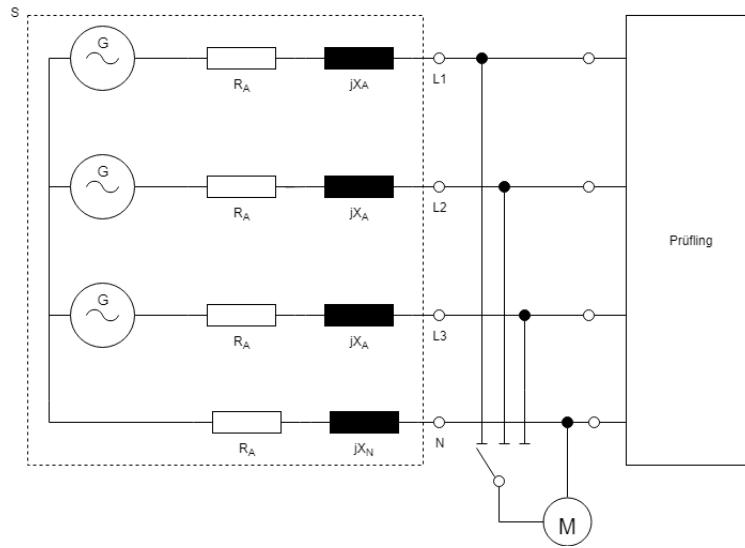


Abbildung C.1: Prüfspannungsquelle mit der Bezugsimpedanz

Es gibt bei der Bezugsimpedanz keine Unterscheidung im Anwendungsbereich zwischen Haushaltsgeräten und gewerblich genutzten Geräten. Stattdessen wird die Langzeit-Flickerstärke eingeführt und auf 65 % der Kurzzeit-Flickerstärke begrenzt [8].

Damit man versteht, welche Bedeutung der Flickerwert hat und wie er zustande gekommen ist, gibt es hier eine Kurze Erklärung des Begriffes:

Mithilfe 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-Meters konnte ein geeignetes 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 der kubische Mittelwert der 12 Pst -Werte und ist in der unterstehenden Formel dargestellt [16].

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

Mithilfe 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 zu den 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 [8].

C.0.3 EN 61000-2-2 Grenzwerte für Oberschwingungsspannungen

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 sind. Die Tabelle C.3 zeigt die verschiedenen Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz. Sie ist 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 im stationären Betrieb.

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 C.3: Kompatibilitätsstufen für einzelne Oberschwingungsspannungen im Niederspannungsnetz

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

$$k = 1.3 + \frac{0.7}{45} \cdot (h - 5) \quad (\text{C.2})$$

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

Die Tabelle C.4 zeigt die erforderlichen Werte in Prozent der subharmonischen Spannung im Niederspannungsnetz bei 230V, bei einer Frequenz von 10 Hz bis 90 Hz. Sie entsprechen dem Kompatibilitätsgrad bezüglich des Flimmers.

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 C.4: Erforderlichen Werte der subharmonischen Spannungen

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 Geräte, wie zum Beispiel Fernsehempfängern. Jede Verwendung von Strom und Spannungen, bei der die Höhe der Amplitude oder der Zeitpunkt des Nulldurchgangs wichtig ist, kann somit gestört werden, wenn die Kombination der vorhandenen unerwünschten Frequenz diese Eigenschaften der Versorgungsspannung 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 [7].

D Vergleich der Resultate von Plecs und Matlab

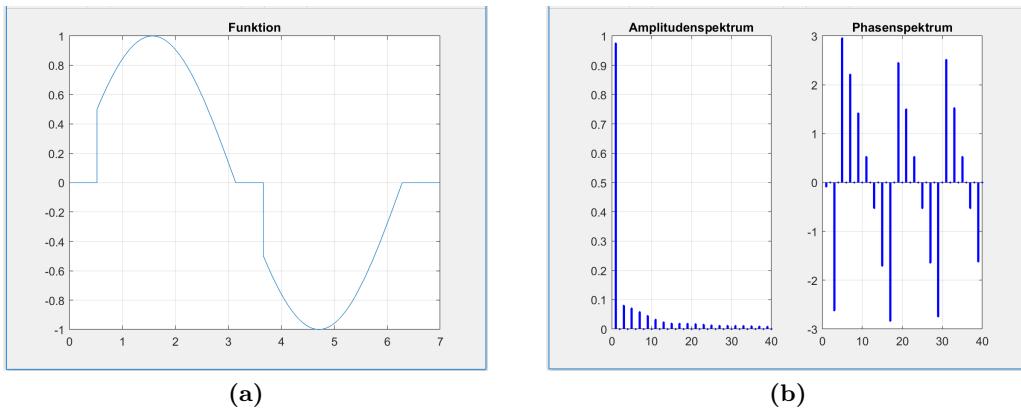


Abbildung D.1: Phasenanschnittsteuerung mit 30° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

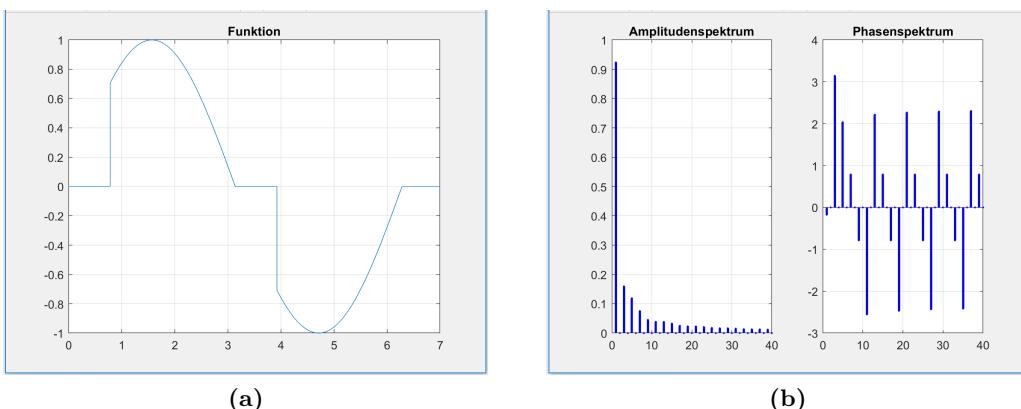


Abbildung D.2: Phasenanschnittsteuerung mit 45° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

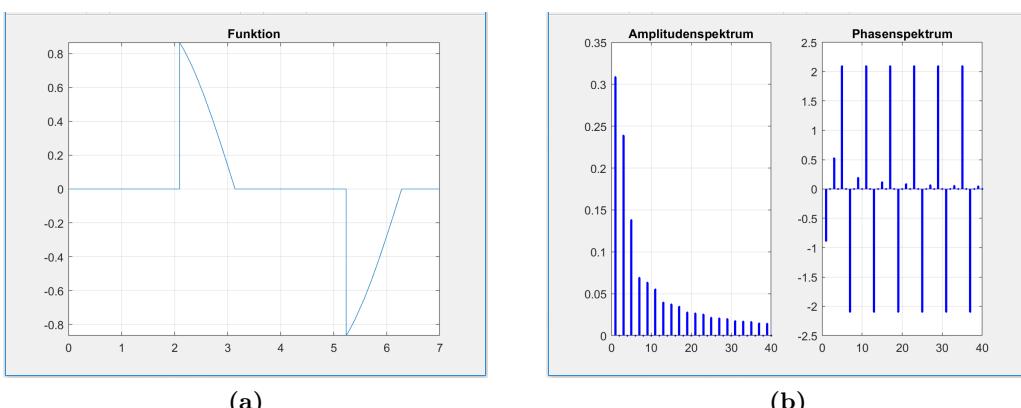


Abbildung D.3: Phasenanschnittsteuerung mit 120° (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

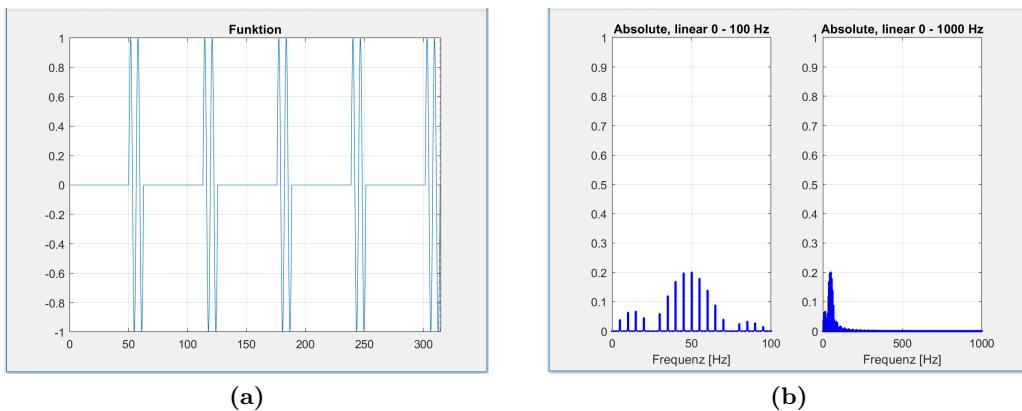


Abbildung D.4: Schwingungspaket mit Duty Cycle 0.2 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

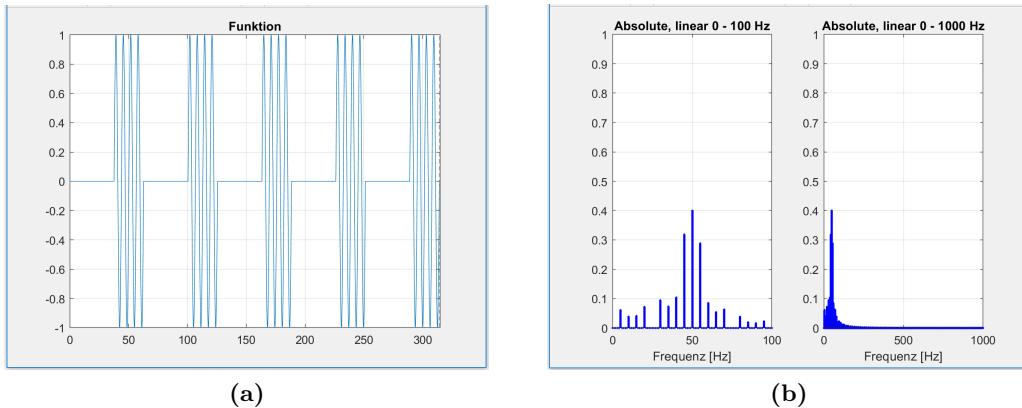


Abbildung D.5: Schwingungspaket mit Duty Cycle 0.4 (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

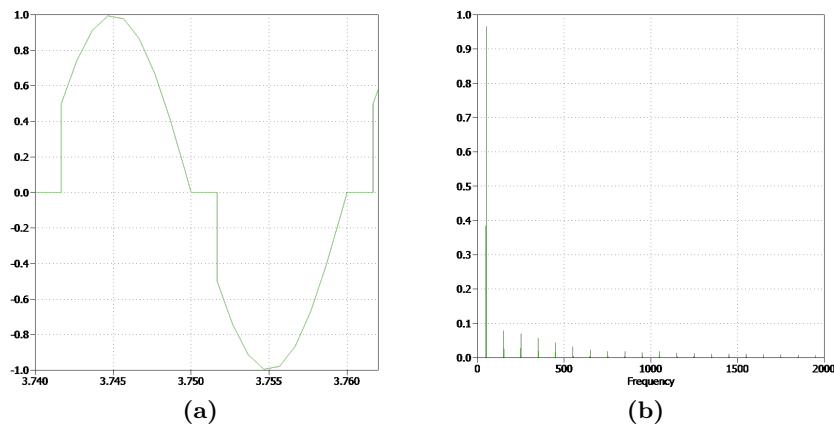


Abbildung D.6: Phasenanschnitt mit 30° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudenspektrum und Phasenspektrum

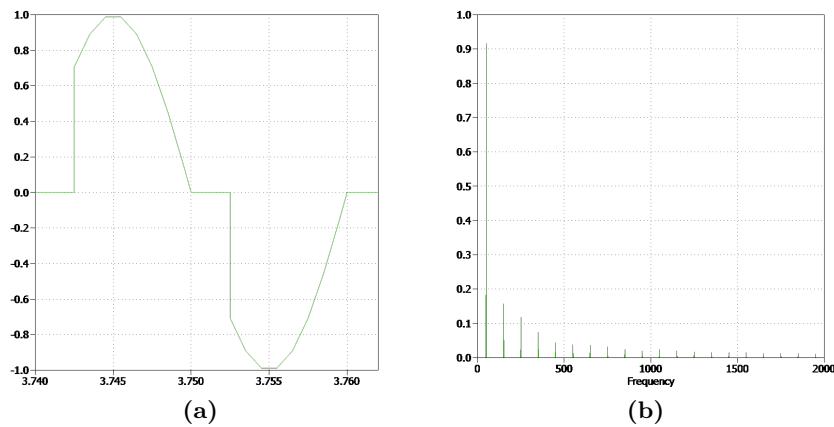


Abbildung D.7: Phasenanschnitt mit 45° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplituden- und Phasenspektrum

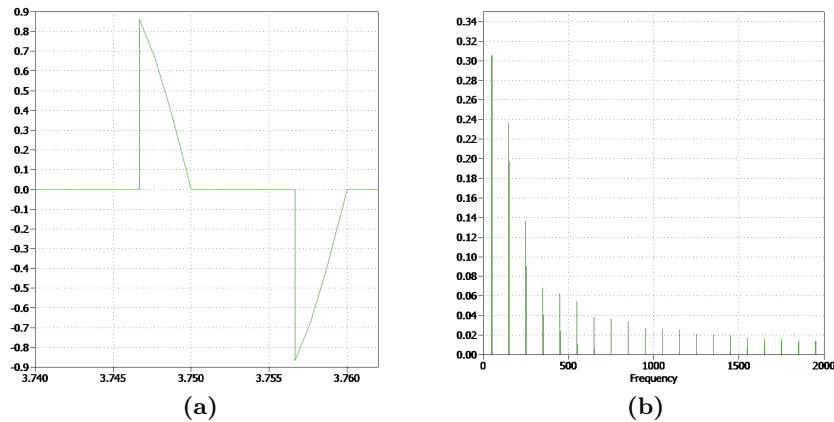


Abbildung D.8: Phasenanschnitt mit 120° simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudens- und Phasenspektrum

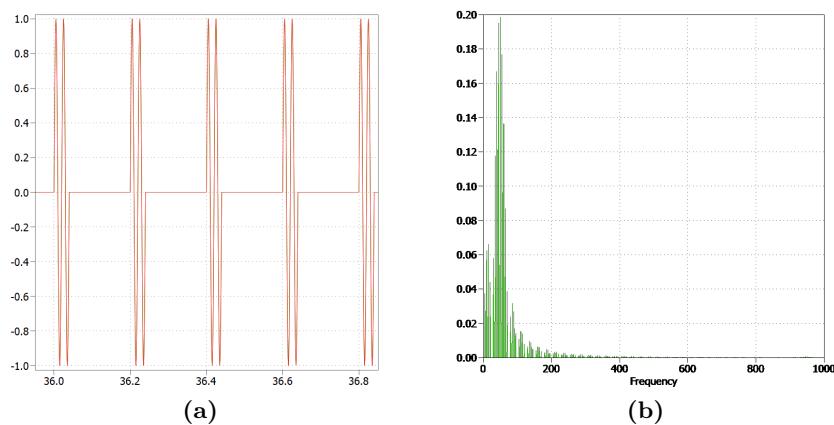


Abbildung D.9: Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.2 simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudenspektrum

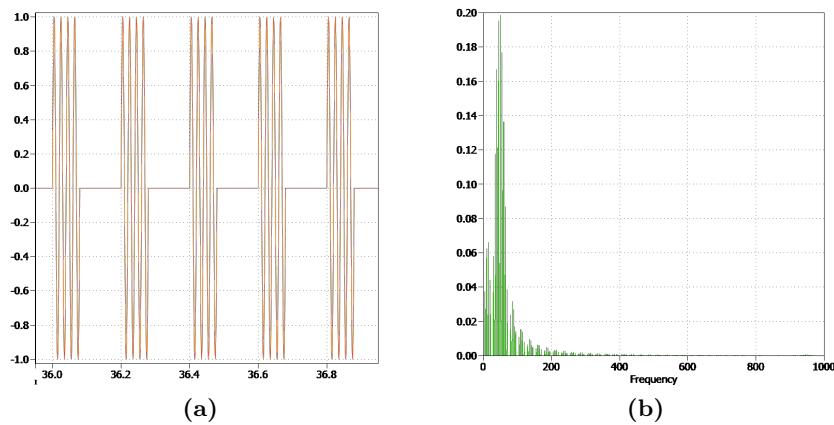


Abbildung D.10: Schwingungspaketsteuerung mit Duty Cycle 0.4 simuliert mit Plecs (a) Eingangssignal (b) Amplitudenspektrum

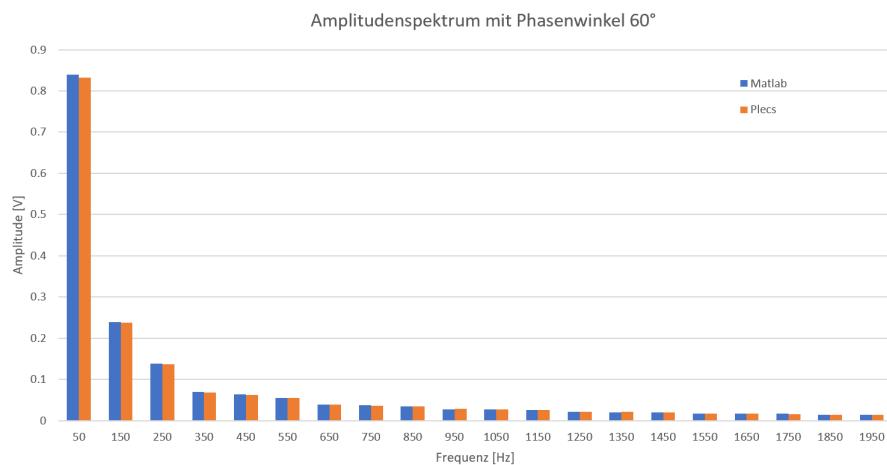


Abbildung D.11: Vergleich der Amplitudenspektrum mit Phasenwinkel von 60°

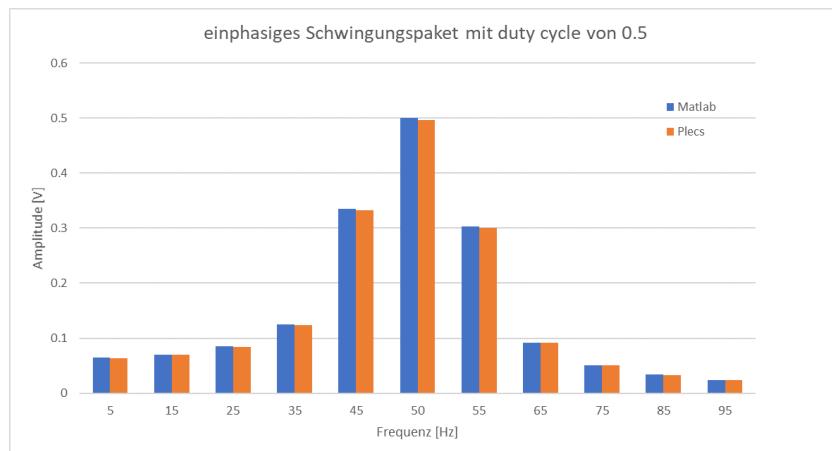


Abbildung D.12: Vergleich des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.5

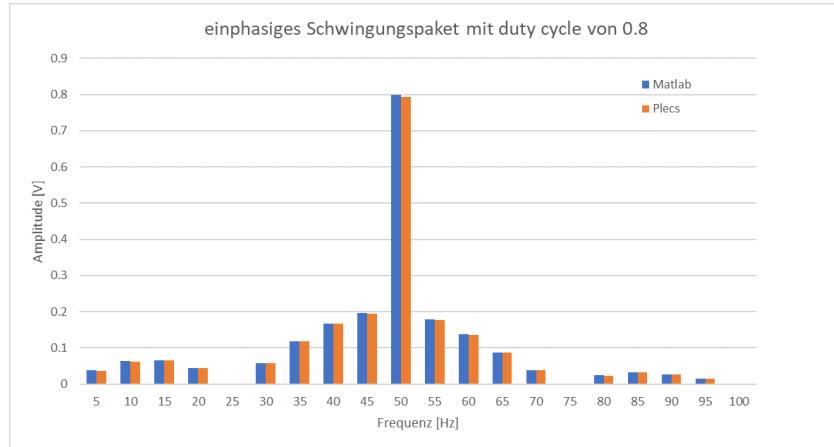


Abbildung D.13: Vergleich des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8

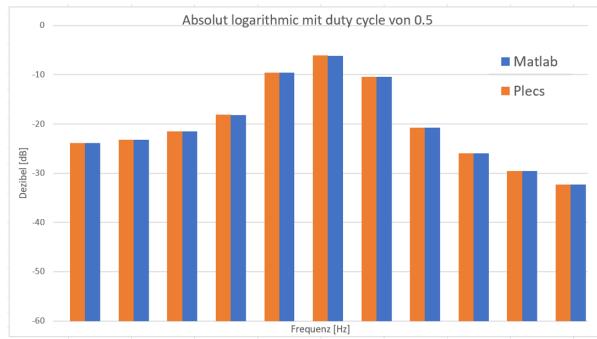


Abbildung D.14: Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8

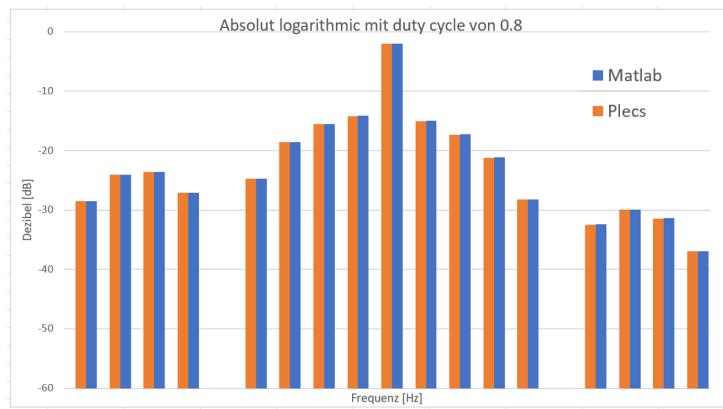


Abbildung D.15: Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaket mit Duty Cycle von 0.8

Frequenz	Matlab	Plecs
50	0.8392	0.832293
150	0.2387	0.236735
250	0.1378	0.136638
350	0.06892	0.0683341
450	0.06316	0.0625278
550	0.05513	0.0545493
650	0.03938	0.0389562
750	0.03716	0.0365021
850	0.03446	0.0336658
950	0.02757	0.0278878
1050	0.0264	0.0276274
1150	0.02506	0.0253678
1250	0.0212	0.0213567
1350	0.02049	0.0205108
1450	0.01969	0.0196758
1550	0.01723	0.0172034
1650	0.01675	0.0166963
1750	0.01622	0.0161076
1850	0.01451	0.0143616
1950	0.01416	0.0137444

Tabelle D.1: Vergleich der Werte des Phasenanschnittes mit 60°

Frequenz	Matlab	Plecs
50	0.5927	0.587846
150	0.3183	0.3157
250	0.1061	0.105158
350	0.1061	0.105196
450	0.06366	0.0630047
550	0.06366	0.0630497
650	0.04547	0.044839
750	0.04547	0.0449042
850	0.03537	0.0342252
950	0.03537	0.0344228
1050	0.02894	0.0296088
1150	0.02894	0.0294399
1250	0.02449	0.0245782
1350	0.02449	0.0245363
1450	0.02122	0.0212078
1550	0.02122	0.0211877
1650	0.01872	0.0186503
1750	0.01872	0.0186415
1850	0.01675	0.0165256
1950	0.01675	0.0165378

Tabelle D.2: Vergleich der Werte des Phasenanschnittes mit 90°

Frequenz	Matlab	Plecs
5	0.06431	0.0637753
15	0.06996	0.0693821
25	0.08488	0.0841842
35	0.1248	0.123802
45	0.3351	0.332314
50	0.5	0.495901
55	0.3032	0.30067
65	0.09226	0.09151
75	0.05093	0.0505147
85	0.03368	0.0334101
95	0.02439	0.0241942

Tabelle D.3: Vergleich der Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5

Frequenz	Matlab	Plecs
5	-28.45	-28.5226
10	-24	-24.0755
15	-23.54	-23.6109
20	-27.02	-27.0954
25		
30	-24.66	-24.7333
35	-18.51	-18.5814
40	-15.48	-15.5559
45	-14.11	-14.1847
50	-1.938	-2.0097
55	-14.98	-15.0538
60	-17.23	-17.2987
65	-21.14	-21.2065
70	-28.18	-28.2546
75		
80	-32.4	-32.4725
85	-29.89	-29.9583
90	-31.36	-31.4339
95	-36.87	-36.9414

Tabelle D.5: Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.8

Frequenz	Matlab	Plecs
5	-23.84	-23.907
15	-23.1	-23.175
25	-21.42	-21.4954
35	-18.07	-18.1455
45	-9.497	-9.56903
50	-6.021	-6.0921
55	-10.37	-10.4382
65	-20.7	-20.7706
75	-25.86	-25.9316
85	-29.45	-29.5225
95	-32.26	-32.3258

Tabelle D.4: Vergleich der absolut logarithmische Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.5

Frequenz	Matlab	Plecs
5	0.0378	0.0374862
10	0.06307	0.0625494
15	0.06653	0.0659863
20	0.04455	0.0441804
25	0	0
30	0.05847	0.0579873
35	0.1187	0.117742
40	0.1682	0.166803
45	0.1969	0.195329
50	0.8	0.793442
55	0.1782	0.176729
60	0.1376	0.136479
65	0.08775	0.0870312
70	0.03898	0.0386607
75	0	0
80	0.02399	0.0237918
85	0.03203	0.0317749
90	0.02703	0.0268104
95	0.01434	0.014221
100	0	0

Tabelle D.6: Vergleich der Werte des Schwingungspaketes mit einem Duty Cycle von 0.8

E Messungen

E.1 Messungen Spannungen Widerstand

Phasenanschnitt 60°

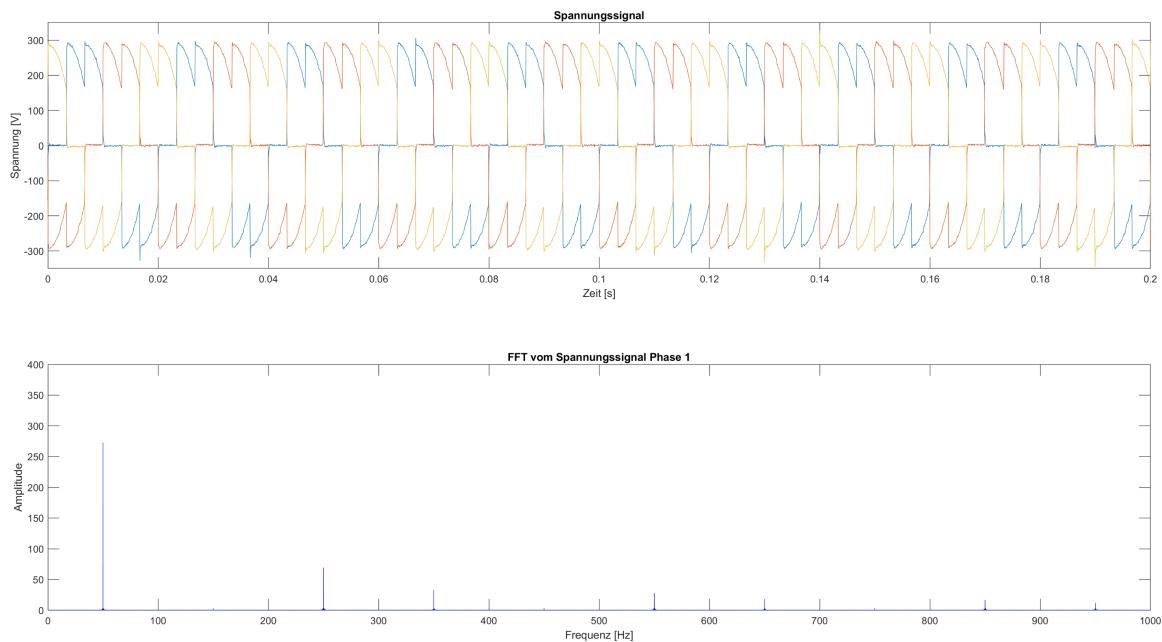


Abbildung E.1: Messung mit Phasenanschnitt 60°

Phasenanschnitt 90°

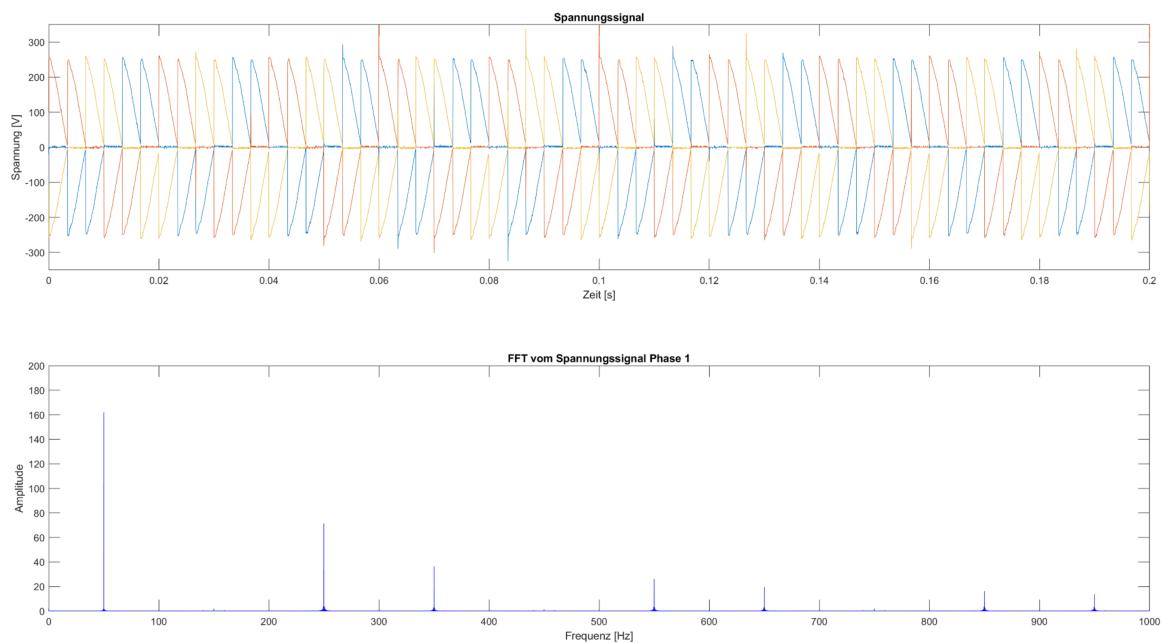


Abbildung E.2: Messung mit Phasenanschnitt 90°

E.2 Messungen Spannungen ASM

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

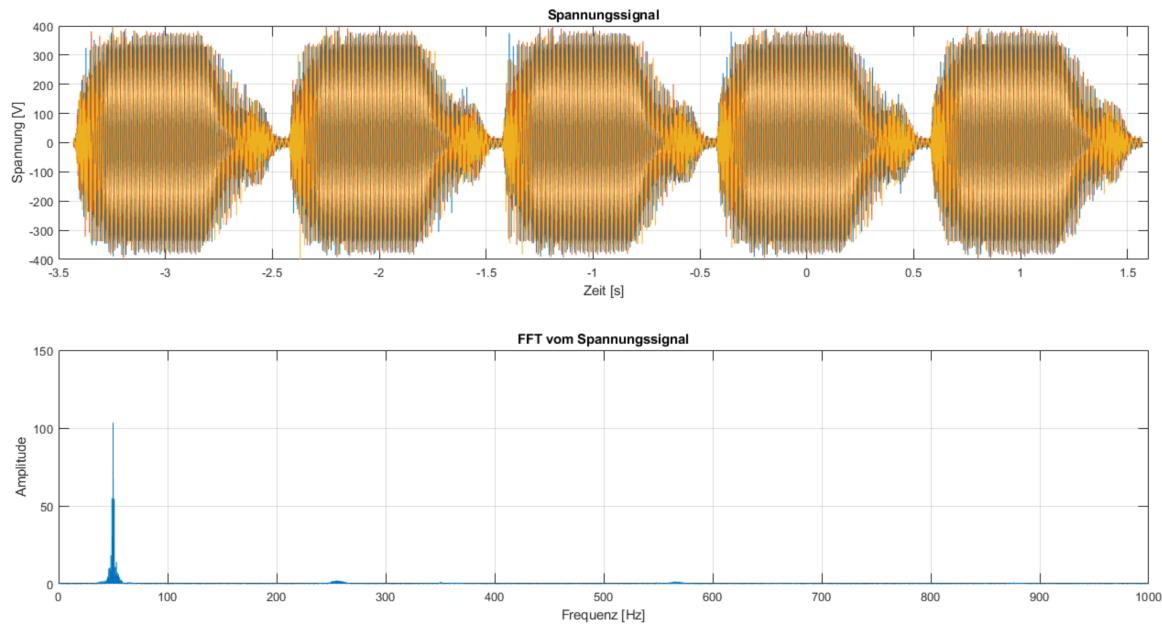


Abbildung E.3: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

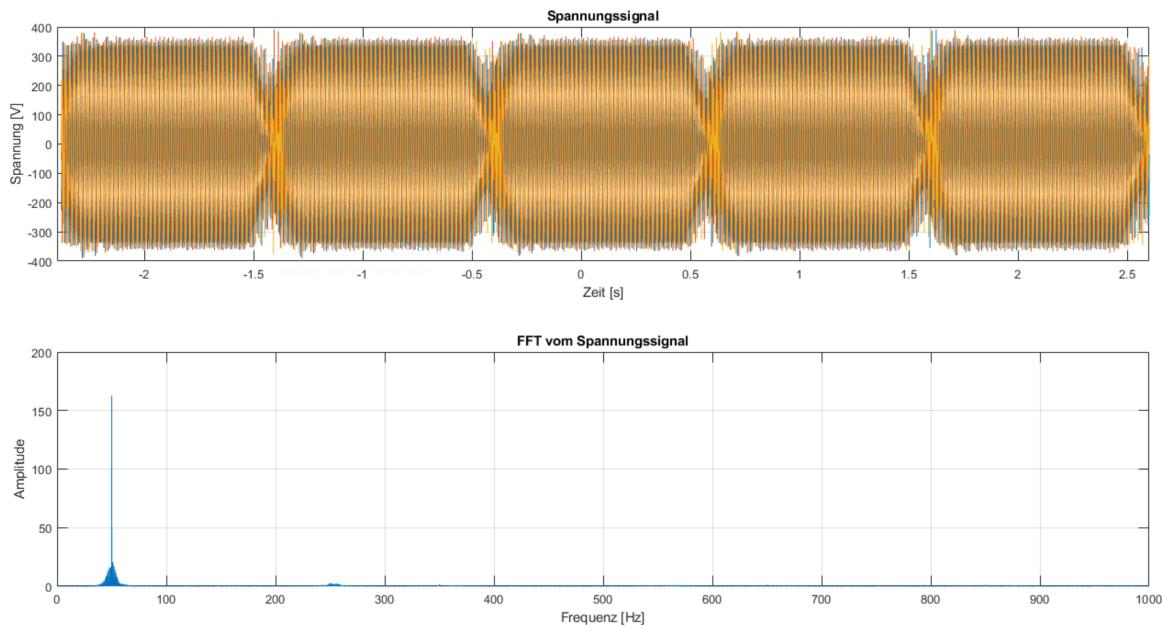


Abbildung E.4: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

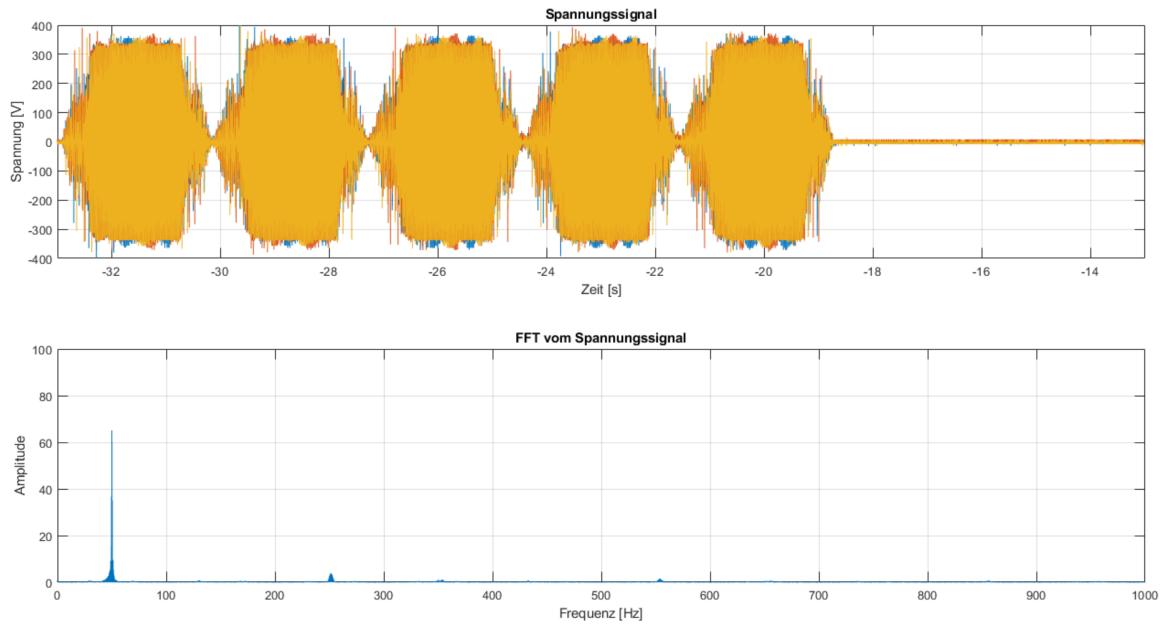
Auf- und Absteuern

Abbildung E.5: Messung mit Sanft Anlasser

E.3 Sparvariante für den Widerstand mit zwei Thyristoren

Phasenanschnitt 60°

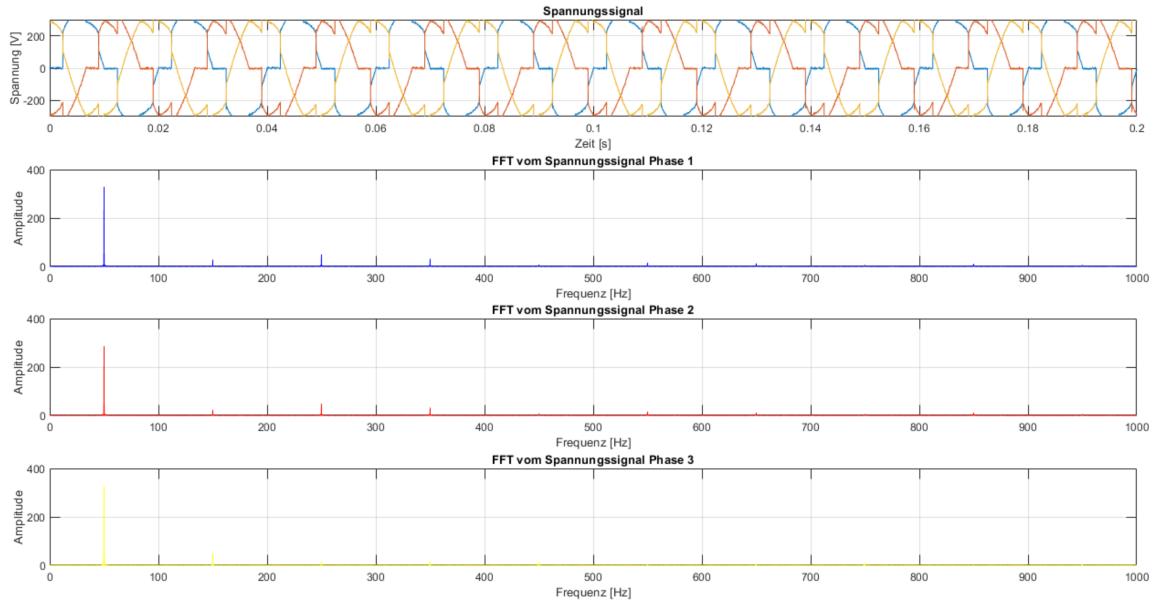


Abbildung E.6: Messung mit Phasenanschnitt 60° und zwei Thyristoren

Phasenanschnitt 90°

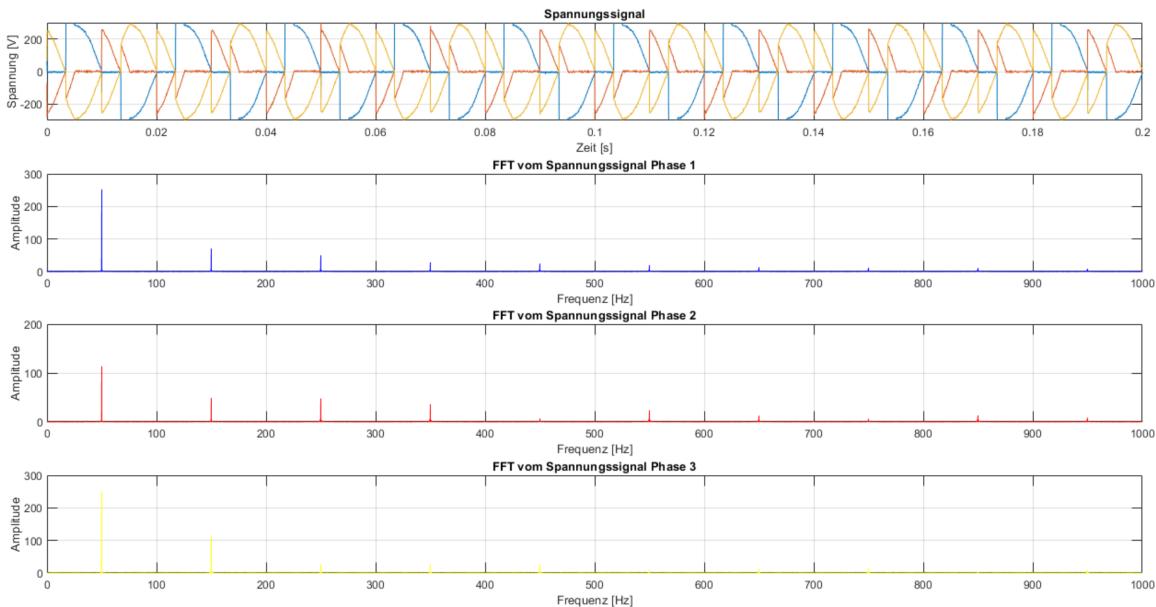


Abbildung E.7: Messung mit Phasenanschnitt 90° und zwei Thyristoren

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

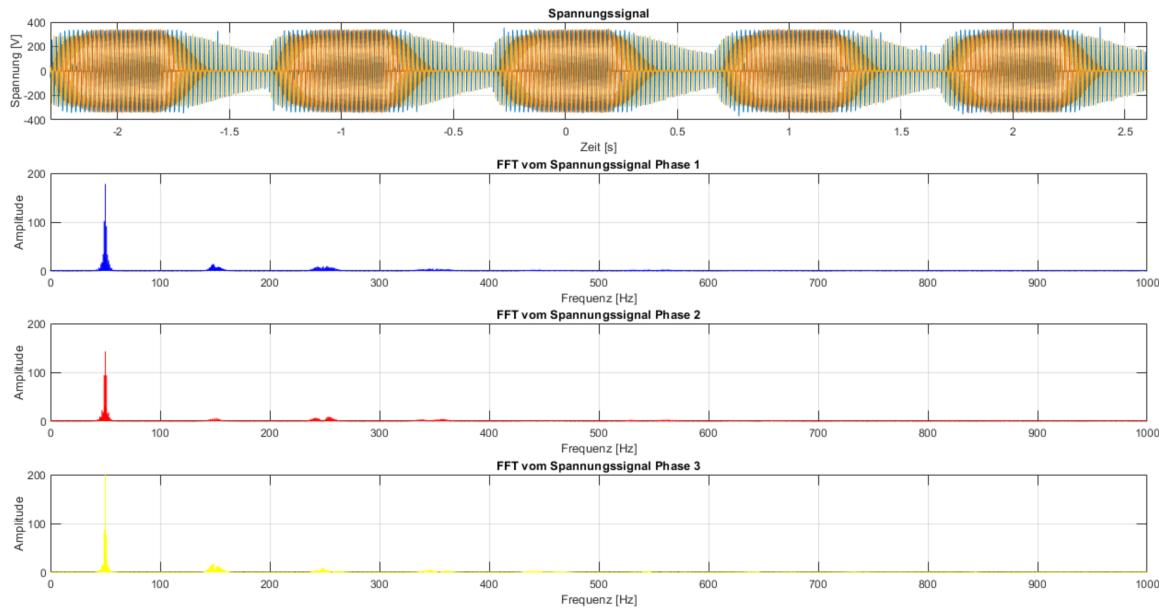


Abbildung E.8: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5 und zwei Thyristoren

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

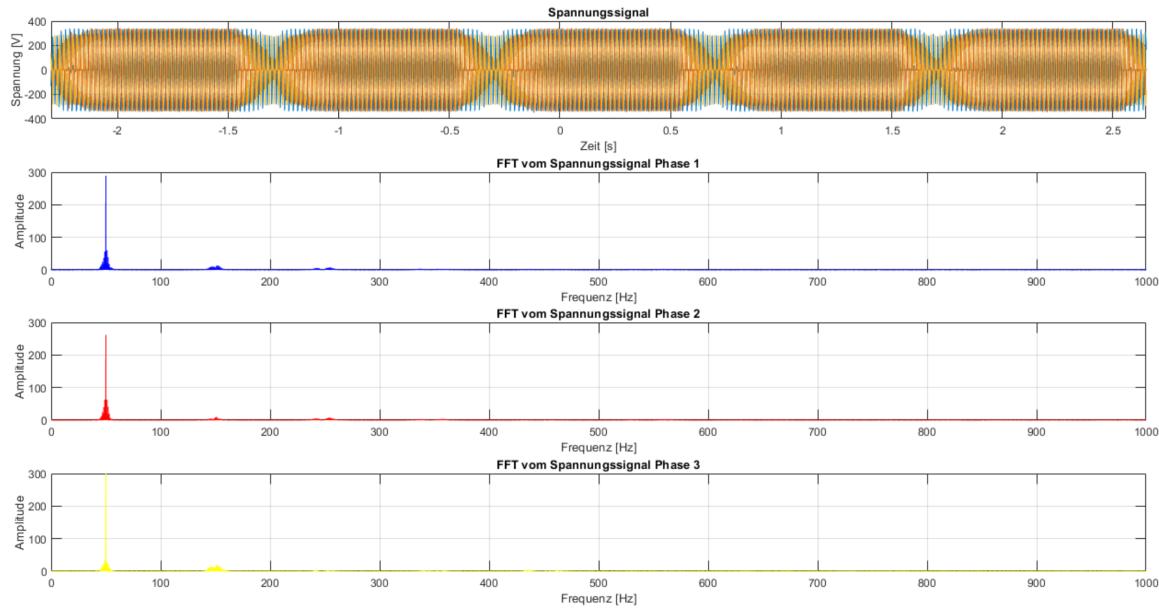


Abbildung E.9: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8 und zwei Thyristoren

Hartes Auf- und Absteuern

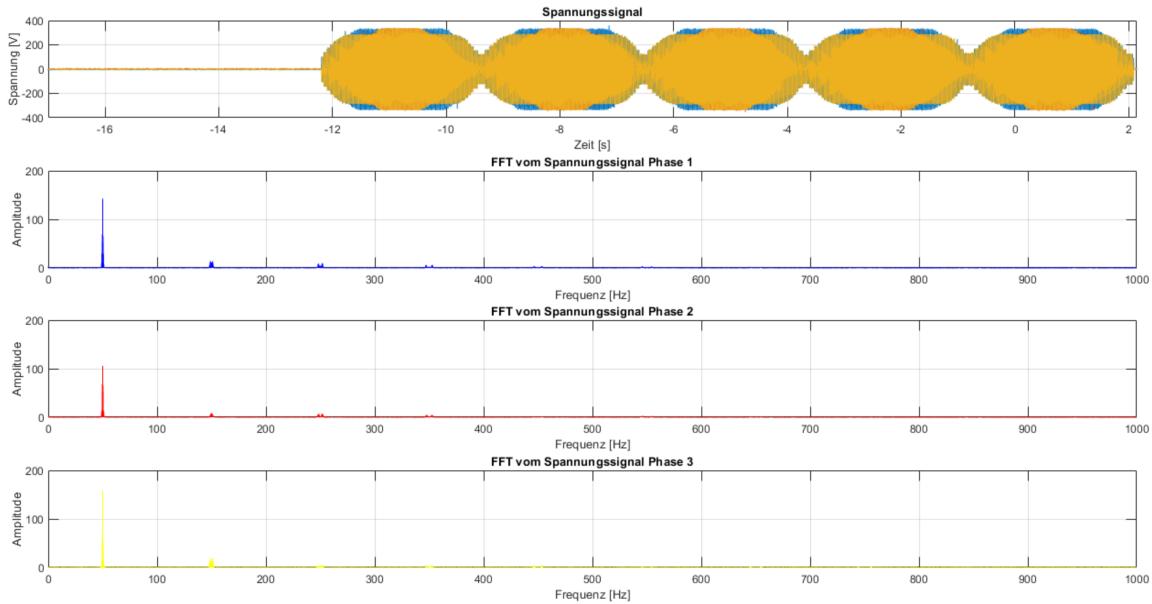


Abbildung E.10: Messung mit dem harten Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren

Frequenz [Hz]	Amplitude Phase 1 [V]	Amplitude Phase 2 [V]	Amplitude Phase 3 [V]
49.65	68.8653	68.5665	57.1292
49.95	67.5597	50.5713	74.4293
50	142.7445	105.9402	157.2093
50.05	35.291	26.4882	38.8518
50.35	65.3531	65.6359	51.887
149.65	9.7876	2.7987	11.8526
150	8.3874	8.3817	7.6543
150.35	11.1326	2.5768	12.4114
Frequenz [Hz]	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 1	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 2	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 3
49.65	48.24%	64.7%	36.34%
49.95	47.32%	47.74%	47.34%
50	100%	100%	100%
50.05	24.72%	25%	24.7%
50.35	45.78%	61.96%	33%
149.65	6.86%	2.64%	7.54%
150	5.88%	7.9%	4.87%
150.35	7.8%	2.43%	7.9%

Tabelle E.1: Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei hartem Auf- und Absteuern

E.3.1 Sparvariante für die ASM mit zwei Thyristoren

Sanftes Auf- und Absteuern

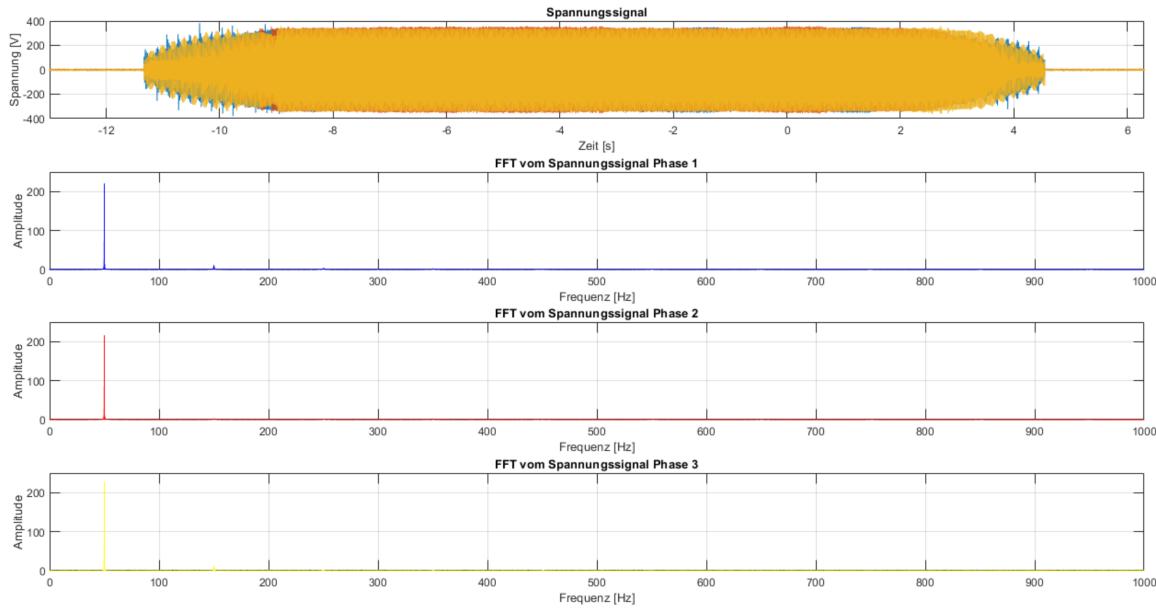


Abbildung E.11: Messung mit dem sanften Auf- und Absteuern und zwei Thyristoren

Frequenz [Hz]	Amplitude Phase 1 [V]	Amplitude Phase 2 [V]	Amplitude Phase 3 [V]
49.9	37.5857	42.9618	47.1945
49.95	75.5033	87.0174	77.0178
50	220.7586	216.2571	227.9957
50.05	111.631	110.0439	102.3768
50.1	44.4045	65.6359	40.8044
149.95	6.9369	2.1636	5.8686
150	11.5575	1.4866	10.115
150.05	6.7811	2.7637	6.5154
Frequenz [Hz]	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 1	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 2	Verhältnis zur Grundschwingung Phase 3
49.9	17.03%	19.46%	20.7%
49.95	34.2%	39.42%	33.78%
50	100%	100%	100%
50.05	50.57%	49.85%	44.9%
50.1	20.11%	29.73%	17.9%
149.95	3.16%	0.98%	2.57%
150	5.24%	0.67%	4.44%
150.05	3.07%	1.25%	2.86%

Tabelle E.2: Amplitudenwerte bei der Frequenzen mit zwei Thyristoren bei sanftem Auf- und Absteuern

E.4 Sparvariante für den Widerstand mit einem Thyristor

Phasenanschnitt 60°

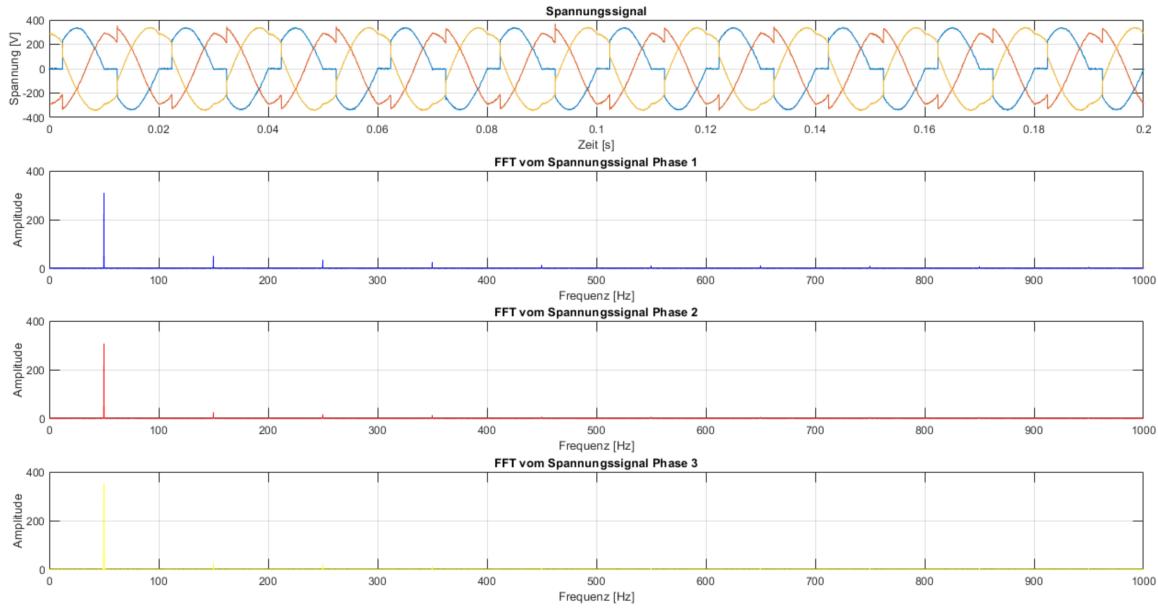


Abbildung E.12: Messung mit Phasenanschnitt 60° und einem Thyristoren

Phasenanschnitt 90°

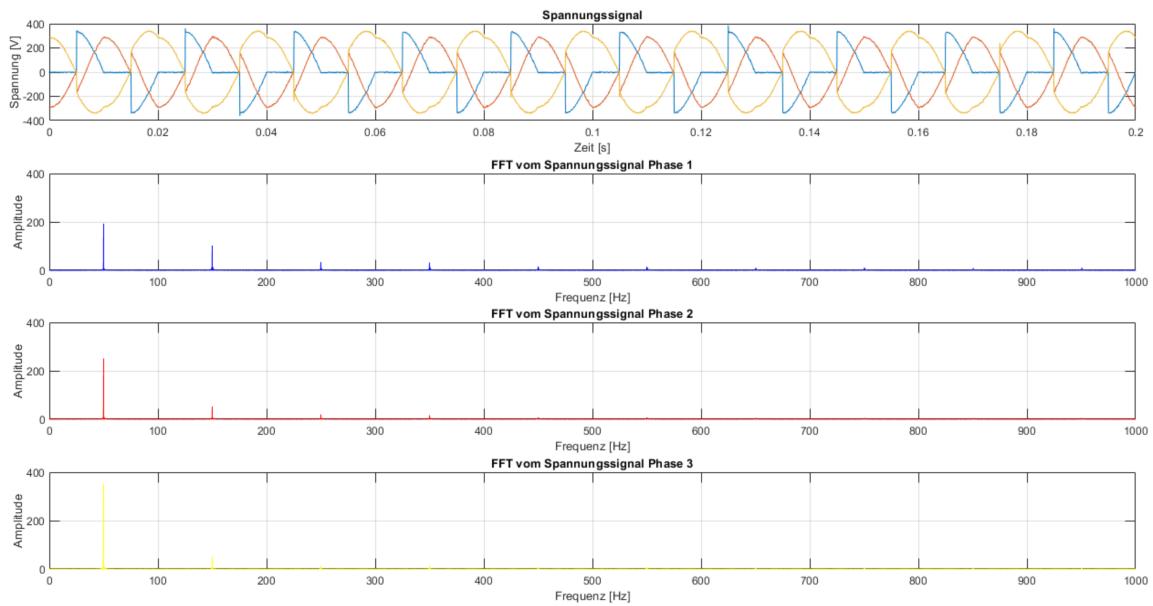


Abbildung E.13: Messung mit Phasenanschnitt 90° und einem Thyristoren

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

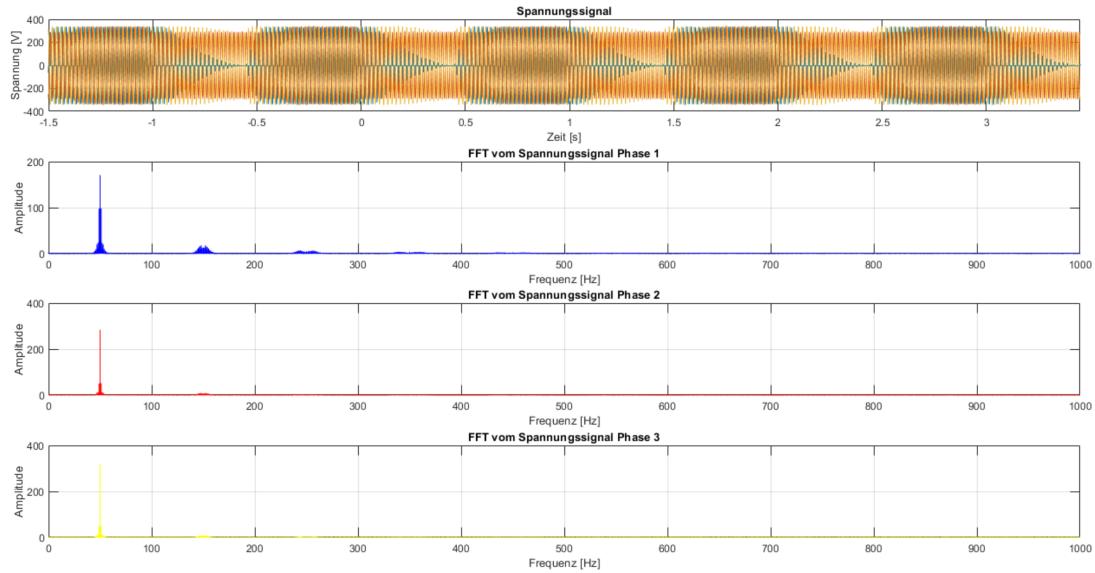


Abbildung E.14: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5 und einem Thyristoren

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

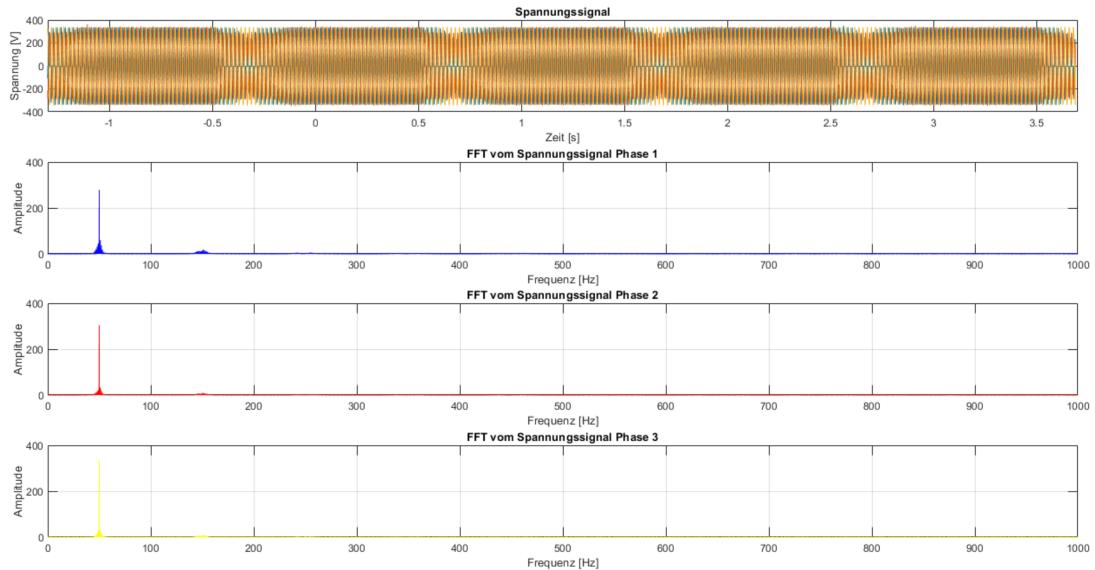


Abbildung E.15: Messung mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8 und einem Thyristoren

Auf- und Absteuern

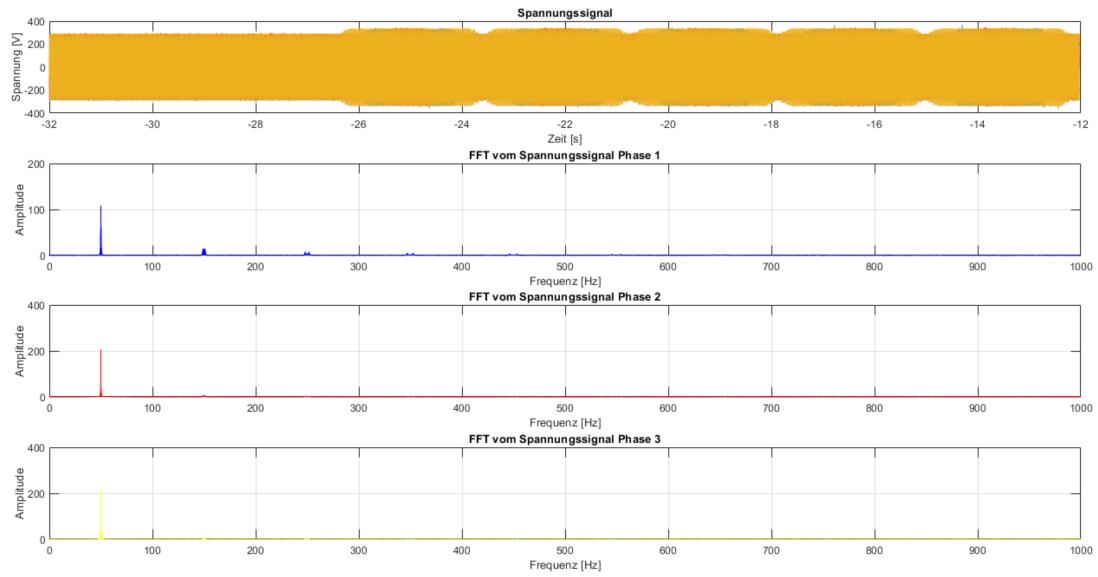


Abbildung E.16: Messung mit Auf- und Absteuern und einem Thyristoren

Langsames Auf- und Absteuern

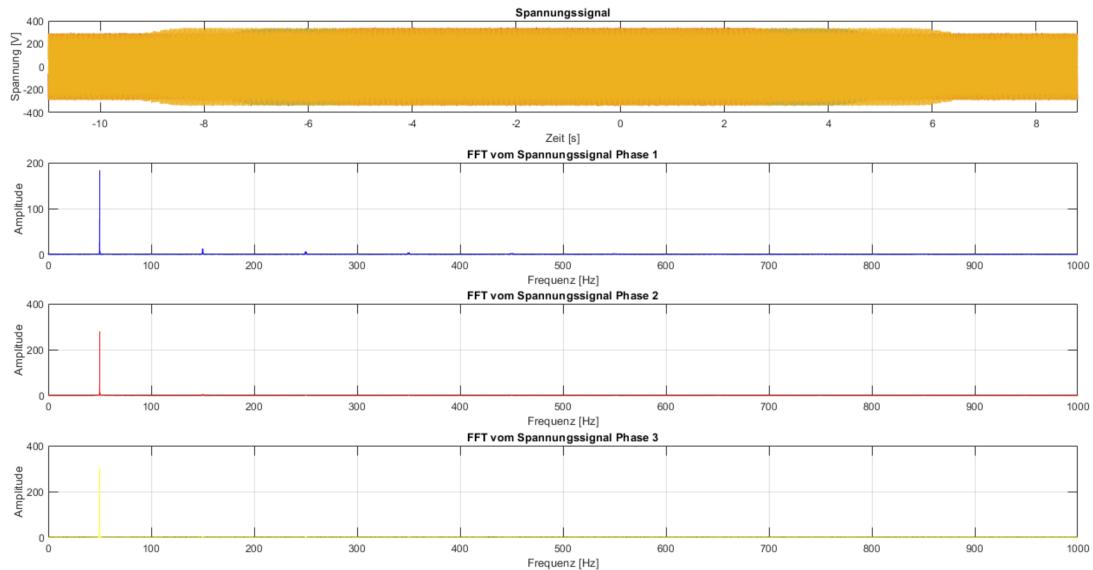


Abbildung E.17: Messung mit dem langsamen Auf- und Absteuern und einem Thyristoren

E.5 Vergleich Messungen Widerstand mit Simulation

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

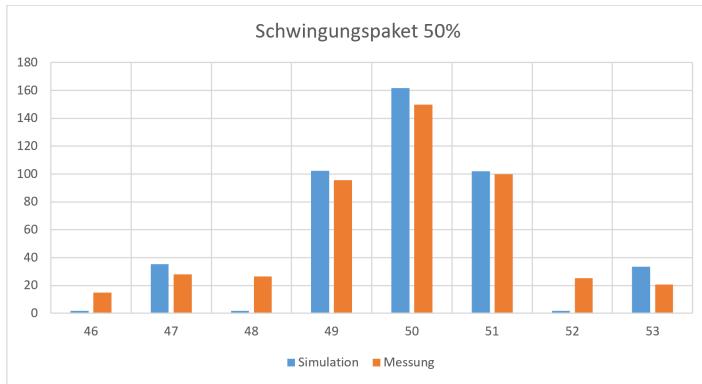


Abbildung E.18: Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

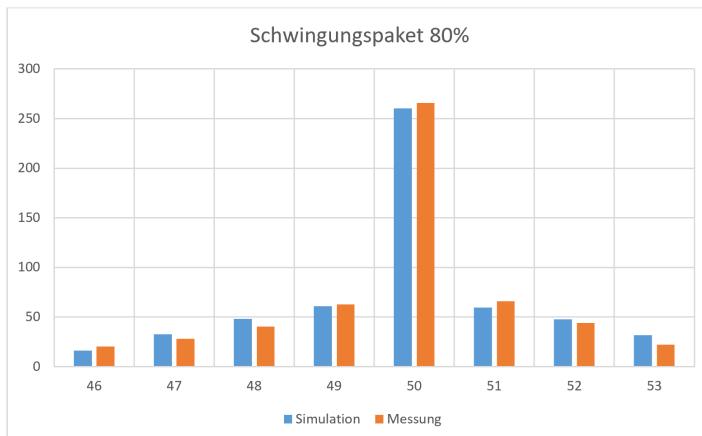


Abbildung E.20: Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

Frequenz [Hz]	Simulation [V]	Messung [V]
46	1.676	14.735
47	35.352	28
48	1.667	26.376
49	102.412	95.6
50	161.597	149.92
51	101.858	99.8
52	1.648	25.134
53	33.293	20.6

Abbildung E.19: Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.5

Frequenz [Hz]	Simulation [V]	Messung [V]
46	16.335	20.173
47	32.649	28.26
48	47.944	40.576
49	61.08	62.694
50	260.212	265.98
51	59.54	65.7
52	47.781	43.812
53	31.664	21.939

Abbildung E.21: Vergleich Messung und Simulation mit Schwingungspaket mit einem Duty Cycle von 0.8

Hartes Auf- und Absteuern

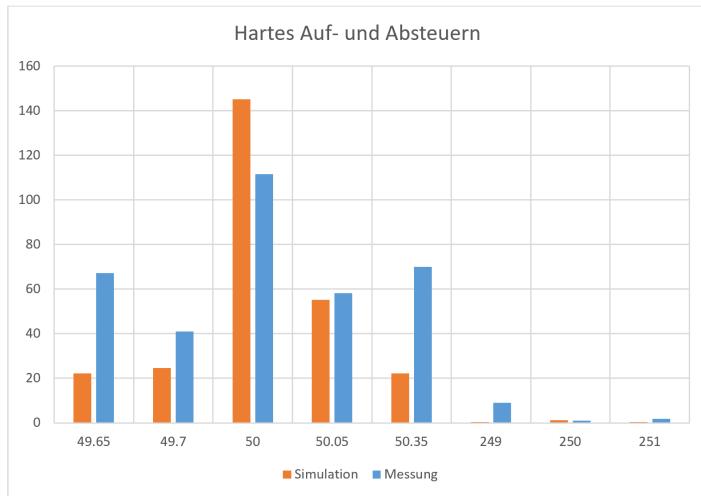


Abbildung E.22: Vergleich Messung und Simulation mit hartem Auf- und Absteuern

Sanftes Auf- und Absteuern

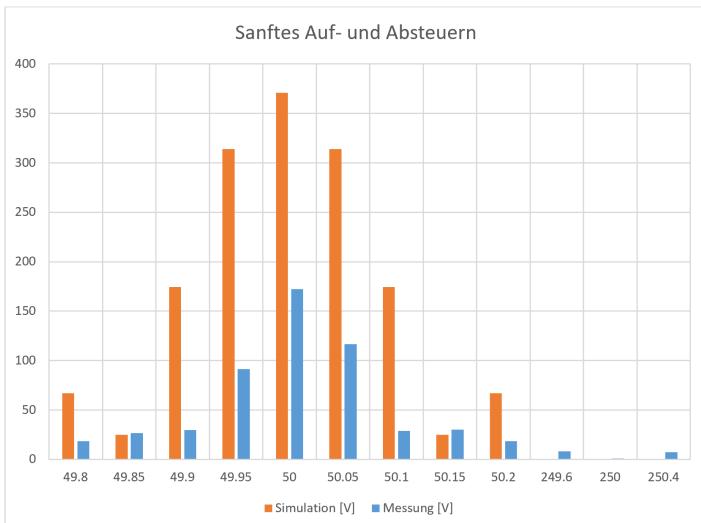


Abbildung E.24: Vergleich Messung und Simulation mit sanftem Auf- und Absteuern

Fre-quenz [Hz]	Simu-lation [V]	Mes-sung [V]
49.65	22.167	67.126
49.7	24.504	40.959
50	145.271	11.676
50.05	55.113	58.202
50.35	22.2	70.065
249	0.473	9.03
250	1.157	0.108
251	0.29021	1.53

Abbildung E.23: Vergleich Messung und Simulation mit hartem Auf- und Absteuern

Fre-quenz [Hz]	Simu-lation [V]	Mes-sung [V]
49.8	66.953	18.522
49.85	24.870	26.576
49.9	174.378	29.507
49.95	314.127	91.266
50	370.962	172.241
50.05	314.051	116.719
50.1	174.266	28.629
50.15	24.871	30.076
50.2	66.83	18.72
249.6	0.188	8.158
250	0.4967	1.158
250.4	0.445	7.466

Abbildung E.25: Vergleich Messung und Simulation mit sanftem Auf- und Absteuern