



UNIVERSITÄT PADERBORN

Die Universität der Informationsgesellschaft

Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik



Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik
Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker

Bachelorarbeit

ENTWICKLUNG UND AUFBAU EINES NETZFREUNDLICHEN 12-PULS GLEICHRICHTERS ZUR ANWENDUNG IN DER ELEKTROLYSE

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing- Joachim Böcker

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Krauter

Betreuer:

M.Sc. Roland Unruh

Vorgelegt von:

Sven York Oberhokamp

Matr.-Nr.: 7097870

Katalog-Nr. BA 51

September 2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle als Entlehnung deutlich gemacht. Das gleiche gilt auch für beigegebene Skizzen und Darstellungen. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form meines Wissens nach noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Paderborn, September 2022

Sven York Oberhokamp

Danksagungen

Die Vorlesungen im Fachgebiet LEA, in denen ich wertvolle und interessante Eindrücke sammeln konnte, haben mich dazu veranlasst meine Bachelorarbeit in diesem Fachgebiet zu schreiben. Ich möchte mit meiner Bachelorarbeit mein Wissen auf diesem Gebiet weiter vertiefen.

Ich möchte mich bei M.Sc. Roland Unruh und Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker für die stets konstruktive Betreuung bedanken. Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich immer unterstützen. Zuletzt möchte ich Prof. Dr-Ing. Stefan Krauter für die Übernahme meiner Zweitprüfung danken.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagungen	II
Abkürzungsverzeichnis	i
Nomenklatur	i
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
1.1. Aufbau Elektrolyseur	4
1.2. Die in dieser Bachelorarbeit behandelte Topologie	5
1.2.1. Aufbau des 12-Puls-Gleichrichters mit Tiefsetzstellern	6
1.3. Ziel der Arbeit	6
1.4. Gliederung der Arbeit	6
2. Dreieck-Dreieck Transformator	7
2.1. Spannungsverläufe	7
2.1.1. Die Spannungsverläufe der Primärseite	7
2.1.2. Die Spannungsverläufe der Sekundärseite	9
2.2. Stromverläufe	11
2.2.1. Stromverläufe der Sekundärseite	11
2.2.2. Stromverläufe der Primärseite	14
2.3. Berechnung wichtiger Kenngrößen	15
2.3.1. Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer	15
2.3.2. Berechnung des Gesamt-Oberschwingungsgehaltes des Stromes	16
2.3.3. Betrachtung der Phasenlage der Netzspannung und des primären Außenleiterstromes	17
2.3.4. Berechnung der Nennleistung des Transformators	18
3. Dreieck-Stern Transformator	19
3.1. Spannungsverläufe	19
3.1.1. Die Spannungsverläufe der Primärseite	19
3.1.2. Die Spannungsverläufe der Sekundärseite	20
3.2. Stromverläufe	21
3.2.1. Stromverläufe der Sekundärseite	21

3.2.2.	Stromverläufe der Primärseite	23
3.3.	Berechnung wichtiger Kenngrößen	25
3.3.1.	Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer	25
3.3.2.	Betrachtung des Amplitudenspektrums des Netzstromes	27
3.3.3.	Betrachtung der Phasenlage der Netzspannung und des primären Außenleiterstromes	27
3.3.4.	Berechnung der Nennleistung des Transformators	28
4.	Dreieck-Dreieck-Stern Transformator	29
4.1.	Spannungsverläufe	29
4.2.	Stromverläufe	30
4.2.1.	Stromverläufe der Sekundärseite	30
4.2.2.	Stromverläufe der Primärseite	30
4.3.	Berechnung wichtiger Kenngrößen	32
4.3.1.	Betrachtung des Gesamt-Oberschwingungsgehaltes des Stromes	32
4.3.2.	Betrachtung des Amplitudenspektrums des Netzstromes	34
4.3.3.	Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer	35
4.3.4.	Optimierung der Kupferverteilung	36
4.3.5.	Berechnung der Scheinleistung	37
4.3.6.	Berechnung der Nennleistung des Transformators	37
5.	Versuchsaufbau	40
5.1.	Aufbau der Schaltung im Labor	40
5.1.1.	12-Puls Gleichrichter	40
5.1.2.	Dreieck-Dreieck-Stern Transformator	41
5.1.3.	Elektrolyseur / Last	43
5.1.4.	Glättungsinduktivität	46
5.2.	Messungen	47
5.2.1.	Dreieck-Stern Transformator	48
5.2.2.	Dreieck-Dreieck Transformator	49
5.2.3.	Dreieck-Dreieck-Stern Transformator	51
6.	Diskussion	53
6.1.	Zusammenfassende Bewertung	53
6.2.	Ausblick	54
A.	Anhang	55
A.1.	Leistungsverhältnis von 18:82 Prozent	55
A.2.	Anpassung der Kupferverteilung	56
A.3.	Berechnung der Last	59
Literaturverzeichnis		62

Abkürzungsverzeichnis

P2G	Power-to-Gas
LPG	Flüssiggas
IPT	Zwischenphasentransformator (Interphase Transformer)
THDi	Gesamt-Oberschwingungsgehalt des Stromes (Total Harmonic Distortion)
DFT	Diskrete Fourier Transformation
PCB	Leiterplatte (Printed Circuit Board)
LED	Leuchtdiode, kurz LED (Light Emitting Diode)

Nomenklatur

$u_{1p}(t), u_{2p}(t), u_{3p}(t)$	Netzspannungen
$u_{12p\Delta}(t), u_{23p\Delta}(t), u_{31p\Delta}(t)$	primärseitige Strangspannung
$\ddot{u}_{\Delta}, \ddot{u}_Y$	Übersetzungsverhältnis des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$\ddot{u}_{\Delta Y}$	Übersetzungsverhältnis der Sekundärseiten der Transformatoren zueinander
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis des gekauften Dreieck-Stern Transformators
N_p	primäre Windungsanzahl des Transformators
N_{Δ}, N_Y	sekundäre Windungsanzahl des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$u_{1sY}(t), u_{2sY}(t), u_{3sY}(t)$	sekundäre Außenleiterspannung des Dreieck-Stern Transformators
$u_{12s\Delta}(t), u_{23s\Delta}(t), u_{31s\Delta}(t)$	sekundäre Strangspannung des Dreieck-Dreieck Transformators (Eingangsspannungen des 6-Puls-Gleichrichters)
$u_{12sY}(t), u_{23sY}(t), u_{31sY}(t)$	sekundäre Strangspannung des Dreieck-Stern Transformators (Eingangsspannungen des 6-Puls-Gleichrichters)
$u_{DC\Delta}(t), u_{DCY}(t)$	Ausgangsspannung des 6-Puls-Gleichrichters des Dreieck-Dreieck- und des Dreieck-Stern Transformators

$P_{DC\Delta}, P_{DCY}$	Leistung am Ausgang des Tiefstellers des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$i_{DC\Delta}(t), i_{DCY}(t)$	Ausgangsstrom des 6-Puls-Gleichrichters des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$i_{Last\Delta}(t), i_{LastY}(t)$	Laststrom des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$i_{Last}(t)$	Laststrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$i_{1s\Delta}(t), i_{2s\Delta}(t), i_{3s\Delta}(t)$	Außenleiterstrom der Dreiecks- Sekundärseite (Eingangsstrom des Gleichrichters)
$i_{1sY}(t), i_{2sY}(t), i_{3sY}(t)$	Außenleiterstrom der Stern-Sekundärseite (Eingangsstrom des Gleichrichters)
$i_{12s\Delta}(t), i_{23s\Delta}(t), i_{31s\Delta}(t)$	sekundärer Strangstrom des Dreieck-Dreieck Transformators
$i_{12p\Delta}(t), i_{23p\Delta}(t), i_{31p\Delta}(t)$	primärseitiger Strangstrom des Dreieck-Dreieck Transformators
$i_{12pY}(t), i_{23pY}(t), i_{31pY}(t)$	primärseitiger Strangstrom des Dreieck-Stern Transformators
$i_{12p}(t), i_{23p}(t), i_{31p}(t)$	primärseitiger Strangstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$i_{1p\Delta}(t), i_{2p\Delta}(t), i_{3p\Delta}(t)$	Netzstrom des Dreieck-Dreieck Transformators (primärer Außenleiterstrom)
$i_{1pY}(t), i_{2pY}(t), i_{3pY}(t)$	Netzstrom des Dreieck-Stern Transformators (primärer Außenleiterstrom)
$i_{1p}(t), i_{2p}(t), i_{3p}(t)$	Netzstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators (primärer Außenleiterstrom)
$l_{p\Delta}$	Länge des Drahtes der primären Windungen
$l_{s\Delta}, l_{sY}$	Länge des Drahtes der sekundären Windungen des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$A_{p\Delta}$	Querschnitt der primären Windungen
$A_{s\Delta}, A_{sY}$	Querschnitt der sekundären Windungen des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$R_{p\Delta}$	Widerstand der primären Windungen
$R_{s\Delta}, R_{sY}$	Widerstand der sekundären Windungen des Dreieck-Dreieck- und des Dreieck-Stern Transformators

$P_{vp\Delta}, P_{vpY}$	primäre Durchlassverluste im Kupfer
$P_{vs\Delta}, P_{vsY}$	sekundäre Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
$P_{12vCu\Delta+Y}$	addierte Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck und Dreieck-Stern Transformators
P_{12vCu}	gesamte Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$P_{12vCu\Delta}, P_{12vCuY}$	gesamte Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
ϕ	Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung
U_f	Spannung der Grundfrequenz
I_f	Strom der Grundfrequenz (f = fundamental)
I_{hges}	Gesamtstrangstrom der Harmonischen des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$I_{hges\Delta}, I_{hgesY}$	Gesamtstrangstrom der Harmonischen des Dreieck-Dreieck- und des Dreieck-Stern Transformators
I_{12pges}	Gesamtstrangstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$I_{12ges\Delta}, I_{12gesY}$	Gesamtstrangstrom des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators
Cu_{ges}	Die Gesamtmenge an Kupfer des Transformators
$P_{Dauer\Delta Y}$	Dauerleistung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$P_{Dauer\Delta+Y}$	Dauerleistung des Dreieck-Dreieck + Stern Transformators
P_{Last}	Lastleistung am Ausgang des Gleichrichters
$L_{m2\Delta}, L_{m2Y}$	sekundäre Hauptinduktivität der Dreieckswindung und der Sternwindung

$I_{12\text{pgesNEU}}$	Gesamtstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators bei einer Lastverteilung von 18:82
$P_{\text{Dauer}\Delta\text{YNEU}}$	Dauerleistung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$J_{s\Delta}, J_{sY}$	sekundäre Stromdichte der Dreieckswindung und der Sternwindung
$J_{p\Delta}$	Stromdichte in der primären Dreieckswindung
$A_{p\Delta\text{NEU}}, A_{sY\text{NEU}}$	Angepasster Leiterquerschnitt der primären Dreieckswindungen und der sekundären Sternwindungen
$J_{p\Delta\text{NEU}}, J_{sY\text{NEU}}$	Angepasste Stromdichte in den primären Dreieckswindungen und den sekundären Sternwindungen
Cu_{gesNeu}	Die Gesamtmenge an Kupfer des Transformators nach Anpassung der Leiterquerschnitte
$R_{p\Delta\text{NEU}}, R_{sY\text{NEU}}$	Angepasster Widerstand der primären Dreieckswindungen und der sekundären Sternwindungen
$P_{vs\text{NEU}}$	Angepasste sekundäre Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$P_{vsY\text{NEU}}$	Angepasste sekundäre Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Stern Transformators
$P_{vp\text{NEU}}$	Angepasste primäre Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$P_{12vCu\text{NEU}}$	Angepasste Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators
$I_{\text{StrangDiode}}$	Strom, der durch einen Dioden-Strang fließt
R_{ges}	Gesamtwiderstand der Parallelschaltung der Widerstände
$P_{R\text{ges}}$	Gesamtverlustleistung der Parallelschaltung der Widerstände
P_{Strang}	Gesamtverlustleistung eines Dioden-Stranges
$P_{R\text{Strang}}$	Gesamtverlustleistung eines Widerstand-Stranges
P_R	Verlustleistung eines Widerstandes
U_{Strang}	Spannung, welche an einem Dioden-Strang anliegt
$U_{R\text{Strang}}$	Spannung, welche an einem Widerstand-Strang anliegt

Abbildungsverzeichnis

1.1. Wasserstoffbereitstellung in Deutschland im Jahre 2020 [1]	2
1.2. Stromerzeugung und Stromverbrauch in Deutschland in Woche 30 2022 [2]	2
1.3. Stromproduktion und Börsenpreis in Deutschland in Woche 30 2022 [3]	3
1.4. Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff [4]	3
1.5. Aufbau eines Elektrolyseurs [5]	4
1.6. Dreieck-Dreieck-Stern Transformator mit 12-Puls-Gleichrichter und Tiefsetzstellern	5
1.7. Lastkennlinien des Elektrolyseurs zu Beginn der Lebensdauer (BOL) und dem Ende der Lebensdauer (EOL) [6]	5
2.1. Dreieck-Dreieck Transformator mit 6-Puls Gleichrichter und Tiefsetzsteller	7
2.2. Netzspannungen	8
2.3. Primäre Strangspannungen	9
2.4. Ausgangsspannung des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	10
2.5. Gleichrichterstrom des Dreieck-Dreieck Transformator mit 6-Puls Gleichrichter	11
2.6. Sekundäre Außenleiterströme des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	12
2.7. Strom in der sekundären Wicklung des Transformators	13
2.8. Strom in der primären Wicklung des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6- Puls Gleichrichter	14
2.9. Netzstrom des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	15
2.10. Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung	17
3.1. Dreieck-Stern Transformator mit 6-Puls Gleichrichter und Tiefsetzsteller	19
3.2. Spannungen am 6-Puls Gleichrichter des Dreieck-Stern Transformators	21
3.3. Strom am Ausgang des 6-Puls Gleichrichters bei konstanter Leistung der Last	22
3.4. Strom in der sekundären Wicklung des Dreieck-Stern Transformators	23
3.5. Strom in der primären Wicklung des Dreieck-Stern Transformators	24
3.6. Netzstrom des Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	24
3.7. Sekundärer Strompfad im Stern und im Dreieck	25
3.8. Vergleich der Durchlassverluste der beiden Transformatoren mit 6-Puls Gleich- richter bei gleichem sekundären Strangstrom	26
3.9. Normiertes Amplitudenspektrum des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Trans- formators mit 6-Puls Gleichrichter	27

3.10. Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung	28
4.1. Dreieck-Dreieck-Stern Transformator mit 12-Puls Gleichrichter und 2 unabhängigen Tiefsetzstellern	29
4.2. Superposition der beiden primären Strangströme	30
4.3. Darstellung der primären Strangströme des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter	31
4.4. Netzstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter	32
4.5. Gesamt-Oberschwingungsgehalt des primären Strangstromes	33
4.6. Gesamt-Oberschwingungsgehalt des Netzstromes	34
4.7. Normiertes Amplitudenspektrum des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators .	34
4.8. Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung	37
5.1. Laboraufbau der beiden 6-Puls-Gleichrichter	40
5.2. Induktivitätsmessgerät mit Dreieck-Dreieck-Stern Transformator, hier bei der Messung der sekundären Dreieckwicklung, des rechten Schenkels	42
5.3. Last zur Simulation eines Elektrolyseurs. In der Grafik sind jeweils zwei Lagen parallel zueinander verschaltet.	43
5.4. Schaltplan von einer Lage der Last mit einer Verlustleistung von 50 W	44
5.5. Strom-Spannungskennlinien der einzelnen Lagen	44
5.6. Messaufbau zur Ermittlung der Strom-Spannungskennlinien der einzelnen La- gen der Last	45
5.7. Spulen zur Glättung des Ausgangsstromes des Gleichrichters	46
5.8. Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	49
5.9. Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter	50
5.10. Messaufbau des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter, Glättungsinduktivität und Last	51
5.11. Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter	52
A.1. Darstellung der primären Strangströme des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter	55
A.2. Netzstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter	56
A.3. Schaltplan von einer Lage der Last mit einer Verlustleistung von 50 W	59
A.4. Strom-Spannungskennlinie bei parallel Schaltung der vier Lagen	61

Tabellenverzeichnis

4.1. Zusammenhang Gesamt-Oberschwingungsgehalt und Nennleistung	39
5.1. Gemessene Hauptinduktivitäten des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators .	41
5.2. Messpunkte, bei denen die folgenden Grafiken aufgenommen wurden	47

1. Einleitung

In Zeiten des Klimawandels ist die Reduzierung von CO₂ ein wichtiges Ziel. Dabei liegt der Fokus auf dem Umstieg von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energiequellen zur Energiegewinnung. Momentan werden für die Wasserstoffproduktion überwiegend fossile Brennstoffe verwendet. Durch die Umstellung auf eine strombasierte (grüne) Wasserstoffproduktion können diese Brennstoffe und die CO₂-Emissionen eingespart werden. Daher sind steuerbare Elektrolyseure für die Energieversorgung der Zukunft von erheblicher Bedeutung. Momentan wird Wasserstoff hauptsächlich in der Industrie genutzt. Von den rund 57 TWh (Heizwert) Wasserstoff, die 2020 in Deutschland produziert und verbraucht wurden, war der überwiegende Anteil grauer Wasserstoff aus Erdgas und Rohöl. Nur etwa 7 % (4 TWh) wurden aus grünem Wasserstoff durch Elektrolyseverfahren abgedeckt (siehe Abbildung 1.1) [1]. Für die Herstellung von 1 kg grünem Wasserstoff werden heute ca. 50 bis 55 kWh benötigt[7]. Der Heizwert von 1 kg Wasserstoff liegt bei 33 kWh[8]. Wenn die restlichen 93 % (53 TWh) ebenfalls durch grünen Wasserstoff ersetzt werden sollen, benötigt man dafür 1,6 Mt grünen Wasserstoff. Angenommen bei der Herstellung von 1 kg Wasserstoff fallen 50 kWh an, entsprechen 1,6 Mt Wasserstoff einer elektrischen Energie von 80 TWh. Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 502,6 TWh Strom verbraucht[9], bei der Umstellung auf ausschließlich grünem Wasserstoff kommen 80 TWh hinzu, was einer prozentualen Steigerung der benötigten elektrischen Energie von 15,92 % entspricht. Der Umstieg auf ausschließlich grünen Wasserstoff führt somit zu einer deutlichen Erhöhung des Energiebedarfs aus erneuerbaren Quellen. Erneuerbare Energiequellen speisen jedoch keine konstanten Leistungen ein, ihre erzeugte Momentanleistung ist von exogenen Einflüssen abhängig. Sie decken daher nicht den Bedarf des Normalkunden. Die Speicherung von elektrischer Energie im großen Maßstab ist sehr schwer und noch nicht ausgereift. Das heißt, dass die elektrische Leistung im selben Moment, wo sie erzeugt wird, auch verbraucht werden muss. Aus diesem Grund schwankt der Strompreis im Tagesverlauf (Abbildung 1.2 und 1.3). Wenn die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien hoch ist, sind die Strompreise niedrig. Die Industrie könnte also mehr Wasserstoff (H₂) zu einem niedrigeren Strompreis produzieren [10], wenn sie die Wasserstoffproduktion an den Verlauf der durch erneuerbaren Energien zur Verfügung stehenden Energiemenge anpasst. Durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energiequellen wird es zu immer größeren Schwankungen in der Energieversorgung und des Strompreises kommen. Bei der Speicherung und dem Transport regenerativer volatiler Energien, insbesondere Wind, Sonne und Biomasse, soll Wasserstoff daher an Bedeutung gewinnen. Der Einsatz von grünem Wasserstoff wird als Schlüsseltechnologie für die Energiewende und den Klimaschutz angesehen[11]. Die Nationale Wasserstoffstrategie erwartet einen Anstieg des Wasserstoffbedarf auf ca. 90 bis 110 TWh im Jahr 2030 und begründet den gesteigerten Bedarf mit Transformationsprozessen in der Industrie und möglichen weiteren Anwendungsfeldern etwa im Verkehrsbereich[11].

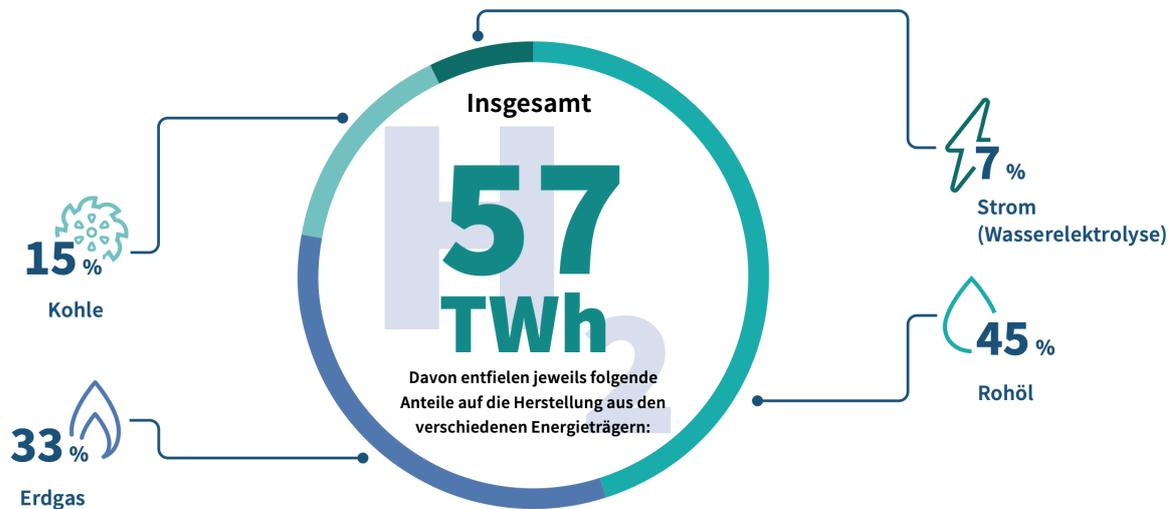


Abbildung 1.1.: Wasserstoffbereitstellung in Deutschland im Jahre 2020 [1]

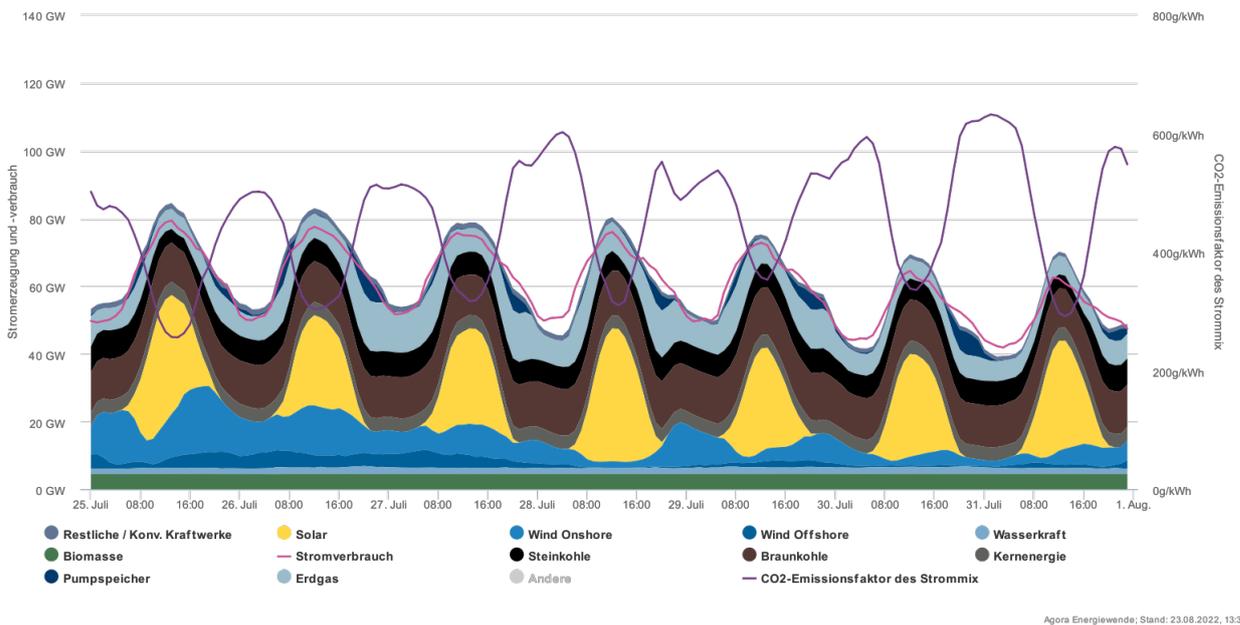


Abbildung 1.2.: Stromerzeugung und Stromverbrauch in Deutschland in Woche 30 2022 [2]

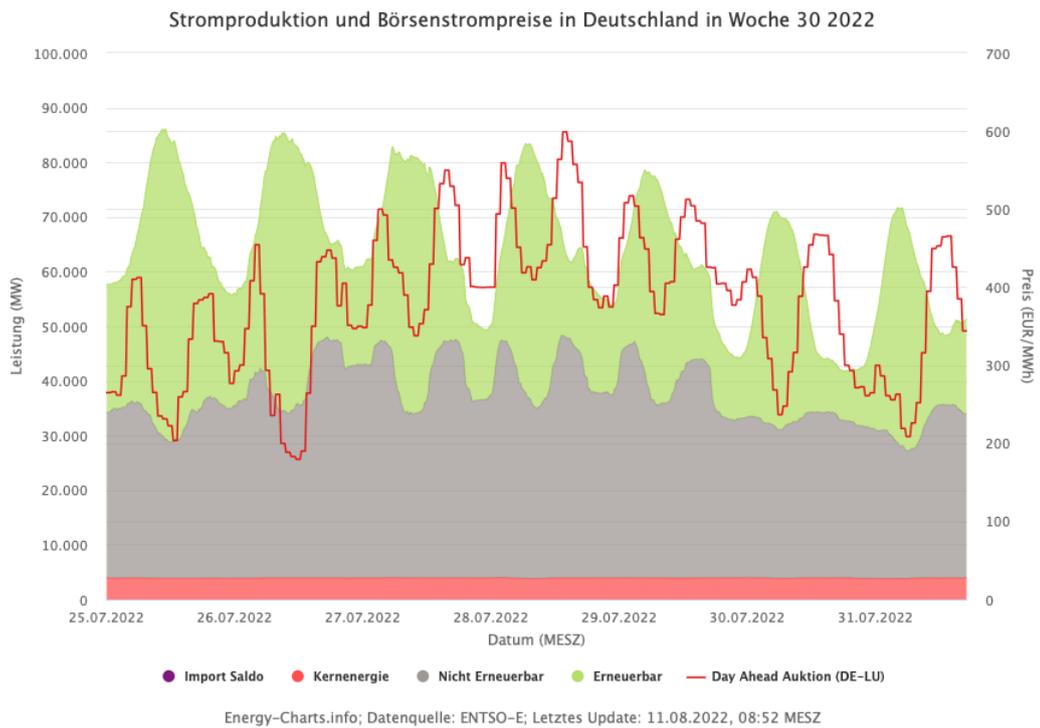


Abbildung 1.3.: Stromproduktion und Börsenpreis in Deutschland in Woche 30 2022 [3]

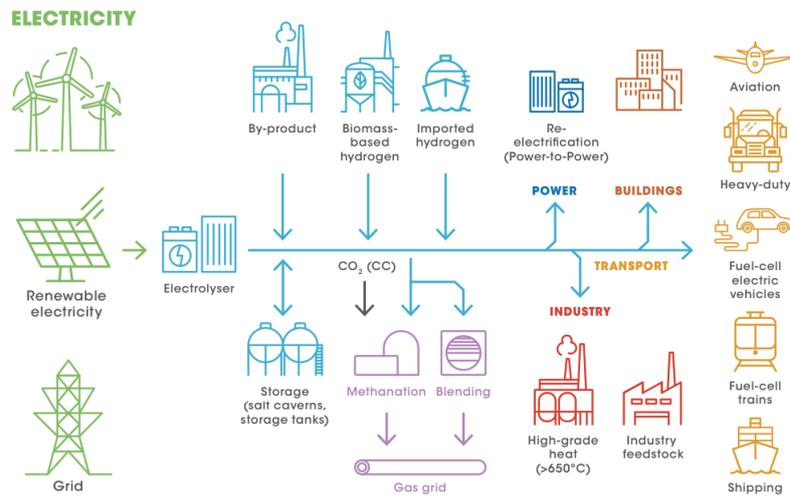


Abbildung 1.4.: Erzeugung und Verwendung von Wasserstoff [4]

In Abbildung 1.4 wird der Prozess der Energiegewinnung, über ihre Speicherung bis hin zu ihren Verwendungsmöglichkeiten gezeigt. In der Abbildung wird der durch Solar- und Windkraft erzeugte Strom genutzt, um mit Hilfe von Elektrolyse grünen Wasserstoff zu erzeugen. Dieser kann dann genutzt werden, um fossile Energieträger und/oder nicht grünen Wasserstoff zu ersetzen. Zudem kann Wasserstoff in der Zukunft, wenn mehr grüner Wasserstoff produziert wird, als direkt genutzt werden kann, dieser zum Beispiel durch den Methanisierungsprozess in grünes Erdgas umgewandelt werden [12], um die CO₂-Emissionen noch weiter zu senken.

1.1. Aufbau Elektrolyseur

In der Abbildung 1.5 ist der Aufbau eines Elektrolyseurs abgebildet. Der eigentliche Elektrolyseur ist hier in Form eines Stacks dargestellt. Als Power-to-Gas (P2G) bezeichnet man den Prozess der Herstellung von grünem Wasserstoff aus einer elektrischen Energiequelle. Der so erzeugte Wasserstoff kann direkt verwendet oder in weiteren Schritten in Synthesegas, Methan oder Flüssiggas (LPG) umgewandelt werden[12]. Die emissionsfreie Erzeugung von Wasserstoff kann mit dem in Abbildung 1.4 dargestellten Elektrolyseur durch Wasserelektrolyse erreicht werden [13]. Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Transformator und dem Gleichrichter, der dem eigentlichen Elektrolyseur vorgeschaltet ist. Diese beiden Bauteile sind wichtig, um aus dem Wechselstrom im Netz einen Gleichstrom zu erzeugen, mit welchem der Elektrolyseur gespeist werden kann.

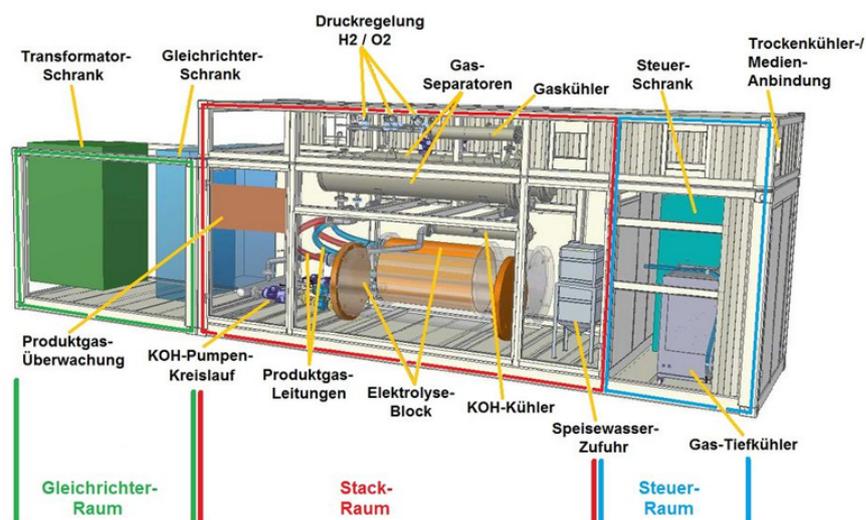


Abbildung 1.5.: Aufbau eines Elektrolyseurs [5]

1.2. Die in dieser Bachelorarbeit behandelte Topologie

Diese Topologie besteht aus einem Transformator mit einer Primärwicklung und zwei Sekundärwindungen, welche jeweils mit einem 6-Puls-Dioden Gleichrichter verschaltet sind. An den Ausgang jedes Gleichrichters werden Tiefsetzsteller angeschlossen, welche den Laststrom am Elektrolyseur regeln. Die Produktionsrate des Wasserstoffs ist proportional zum Laststrom. Somit kann die Menge des produzierten Wasserstoffs dank der Tiefsetzsteller an den Strompreis angepasst werden. Außerdem steigt der ohmsche Widerstand der Wasserspaltungsreaktion mit der Alterung des Elektrolyseurs deutlich an, weshalb die Ausgangsspannung bei gleichem Laststrom deutlich ansteigt. Auch deshalb ist es wichtig die Leistung am Elektrolyseur über die Tiefsetzsteller steuern zu können[6].

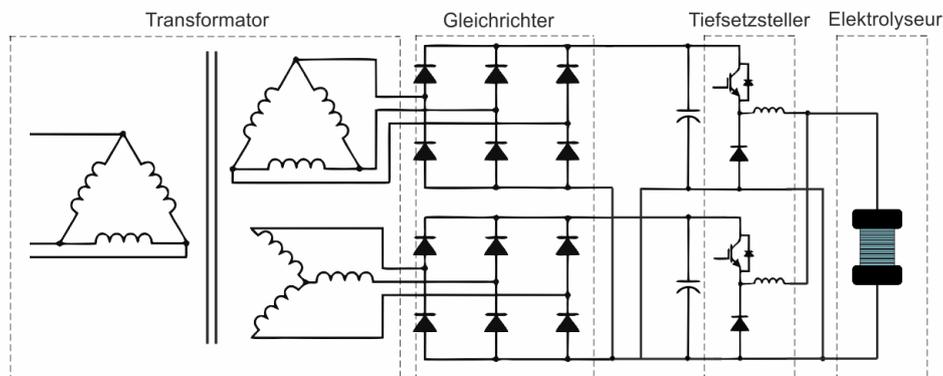


Abbildung 1.6.: Dreieck-Dreieck-Stern Transformator mit 12-Puls-Gleichrichter und Tiefsetzstellern

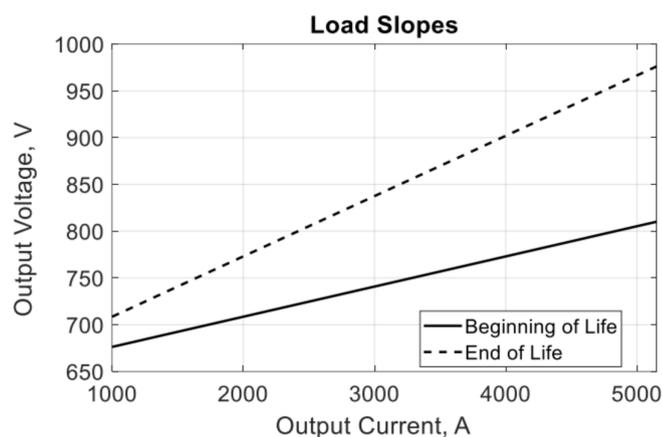


Abbildung 1.7.: Lastkennlinien des Elektrolyseurs zu Beginn der Lebensdauer (BOL) und dem Ende der Lebensdauer (EOL) [6]

1.2.1. Aufbau des 12-Puls-Gleichrichters mit Tiefsetzstellern

- **Transformator Primärseite**
Der Transformator ist primärseitig im Dreieck verschaltet.
- **Transformator Sekundärseite**
Die Sekundärwicklungen sind unterschiedlich verschaltet. Sie werden
 - im Dreieck und
 - im Sternverschaltet.
- **6-Puls-Dioden-Gleichrichter**
6 Dioden bilden jeweils einen Gleichrichter. Die Gleichrichter haben ein gemeinsames negatives Potential. Der Zwischenphasentransformator (Interphase Transformer) (IPT) entfällt aufgrund der Tiefsetzsteller.
- **Tiefsetzsteller**
Der Tiefsetzsteller besteht aus einem Leistungsschalter (hier IGBT), einer Diode und einer Induktivität. Der Tiefsetzsteller wird nicht betrachtet, es wird eine ideale Regelung angenommen.
- **Elektrolyseur**
Im Elektrolyseur wird mithilfe von Strom Wasser in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) aufgespalten.

1.3. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines netzfreundlichen 12-Puls Gleichrichters zur Anwendung in der Elektrolyse. Jedem Gleichrichter sind Tiefsetzsteller nachgestellt, welche den Vorteil bringen, dass die übertragene Leistung der im Dreieck und im Stern geschalteten Sekundärwindungen variiert werden kann. Dabei wird angenommen, dass die aufgenommene Leistung innerhalb einer Periode immer konstant ist. Ziel ist es herauszufinden, welche Leistungskonstellation der beiden Sekundärseiten die Verlustärmste ist und ob diese Konstellation auch die netzfreundlichste bezüglich der in das Netz eingespeisten harmonischen Ströme ist.

1.4. Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Analyse des Dreieck-Dreieck Transformators. Die Analyse des Dreieck-Stern Transformators wird in Kapitel 3 behandelt. In Kapitel 4 wird der Dreieck-Dreieck-Stern Transformator analysiert. Anschließend wird in Kapitel 5 die Schaltung im Labor aufgebaut. In Kapitel 6 findet die zusammenfassende Bewertung der Ergebnissen statt.

2. Dreieck-Dreieck Transformator

Zum besseren Einstieg werden zuerst einzelne 6-Puls Gleichrichter, statt eines 12-Puls-Gleichrichters betrachtet. Um die Funktionsweisen der Schaltungen abzubilden, wurde eine Simulation jeder Schaltung in Matlab aufgebaut.

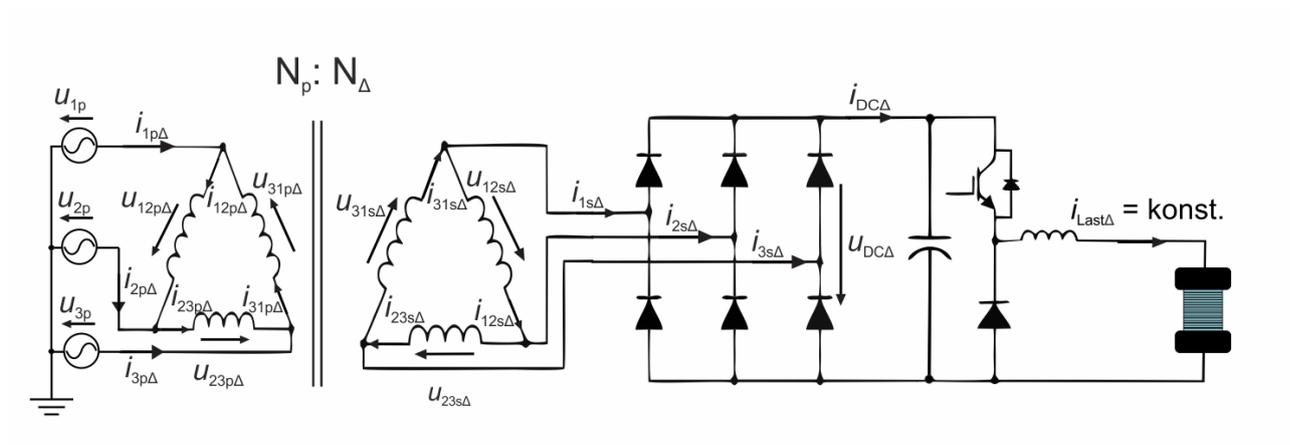


Abbildung 2.1.: Dreieck-Dreieck Transformator mit 6-Puls Gleichrichter und Tiefsetzsteller

In der Simulation werden sinusförmige Netzspannungen mit gleicher Amplitude und einem Phasenversatz von 120° , sowie ein idealer Transformator angenommen.

2.1. Spannungsverläufe

2.1.1. Die Spannungsverläufe der Primärseite

Die Leiter-Erd Spannungen sind:

$$u_{1p}(t) = \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

$$u_{2p}(t) = \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.2)$$

$$u_{3p}(t) = \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.3)$$

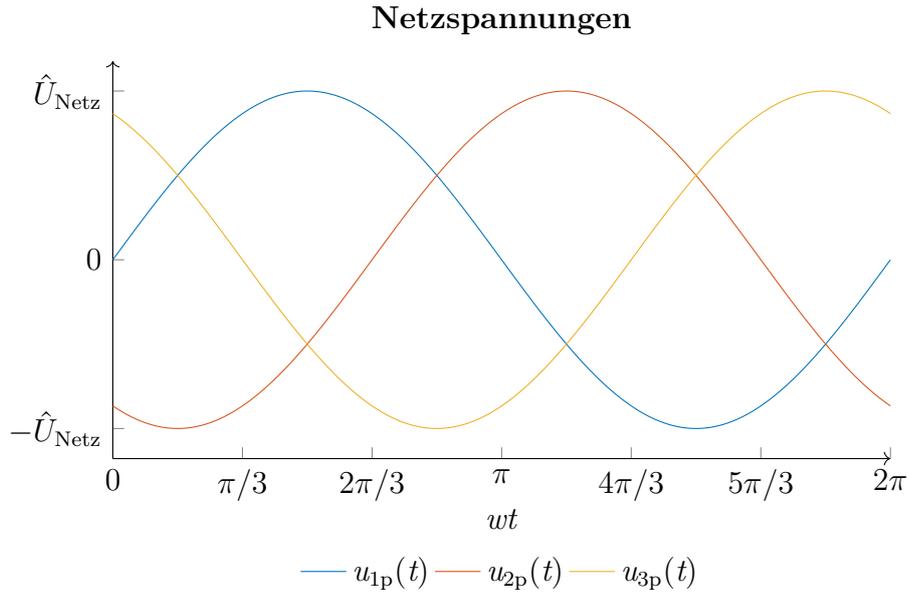


Abbildung 2.2.: Netzspannungen

Die Strangspannungen, sind gegeben durch:

$$u_{12p\Delta}(t) = u_{1p}(t) - u_{2p}(t) = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (2.4)$$

$$u_{23p\Delta}(t) = u_{2p}(t) - u_{3p}(t) = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.5)$$

$$u_{31p\Delta}(t) = u_{3p}(t) - u_{1p}(t) = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_{\text{Netz}} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) \quad (2.6)$$

Die Primärwicklung des Transformators ist im Dreieck geschaltet, sodass die Außenleiter-
spannungen gleich den Strangspannungen sind.

Das Übersetzungsverhältnis des Transformators wird aufgrund der zuvor genannten Gegebenheit wie folgt gewählt:

$$\ddot{u}_{\Delta} = \frac{N_p}{N_{\Delta}} \gg 1 \quad (2.7)$$

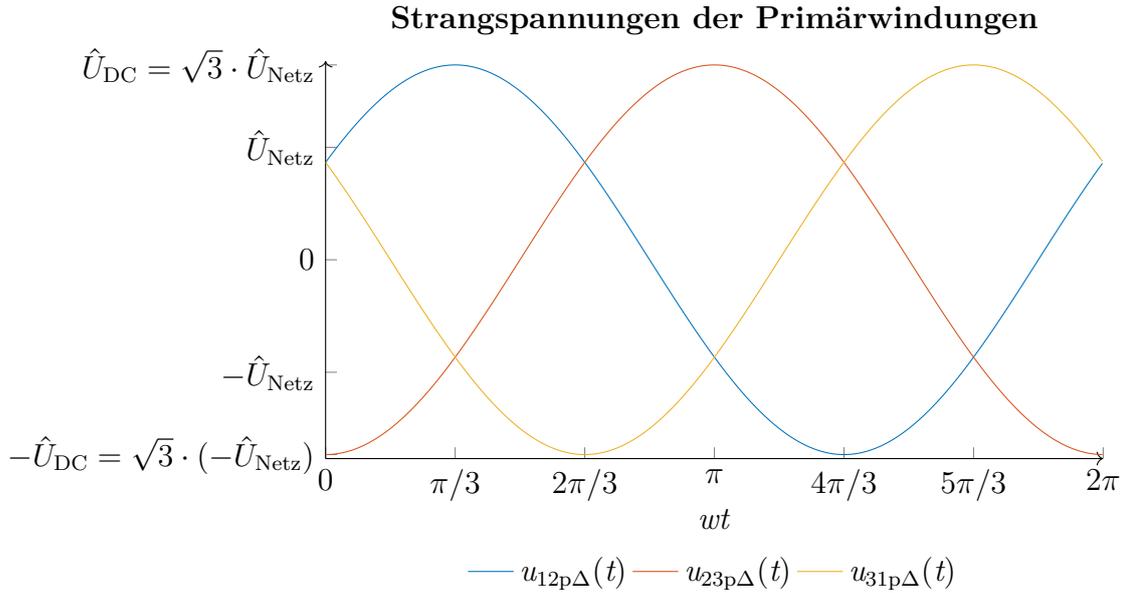


Abbildung 2.3.: Primäre Strangspannungen

2.1.2. Die Spannungsverläufe der Sekundärseite

$$u_{12s\Delta}(t) = \frac{u_{12p\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.8)$$

$$u_{23s\Delta}(t) = \frac{u_{23p\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.9)$$

$$u_{31s\Delta}(t) = \frac{u_{31p\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.10)$$

Die sekundären Strangspannungen entsprechen den Eingangsspannungen des 6-Puls Dioden-Gleichrichters. Dioden-Gleichrichter besitzen ein gutes Gleichrichtungsverhältnis und die Ausgangsspannung des Gleichrichters weist einen kleinen Welligkeitsfaktor, aufgrund der Kommutierung bei Netzfrequenz auf. Dioden Gleichrichter sind somit sehr gut für die Anwendung in der Elektrolyse geeignet[12].

Die gleichgerichteten Strangspannungen ergeben die Ausgangsspannung des Gleichrichters ($u_{DC\Delta}(t)$). Wobei die Gleichrichterspannung nicht abhängig von der entnommenen Leistung, sondern nur vom Momentanwert der Netzspannung ist.

$$u_{DC\Delta}(t) = \begin{cases} |u_{12s\Delta}(t)|, & \text{wenn } |u_{12s\Delta}(t)| \geq \max\{|u_{23s\Delta}(t)|, |u_{31s\Delta}(t)|\} \\ |u_{23s\Delta}(t)|, & \text{wenn } |u_{23s\Delta}(t)| > |u_{12s\Delta}(t)| \text{ und } |u_{23s\Delta}(t)| \geq |u_{31s\Delta}(t)| \\ |u_{31s\Delta}(t)|, & \text{wenn } |u_{31s\Delta}(t)| > \max\{|u_{12s\Delta}(t)|, |u_{23s\Delta}(t)|\} \end{cases} \quad (2.11)$$

Die folgende Abbildung 2.4 zeigt anschaulich die Erhöhung der Frequenz am Ausgang des Gleichrichters, auf das 6-fache der Netzfrequenz.

sekundäre Strangspannungen und Ausgangsspannung des Gleichrichters

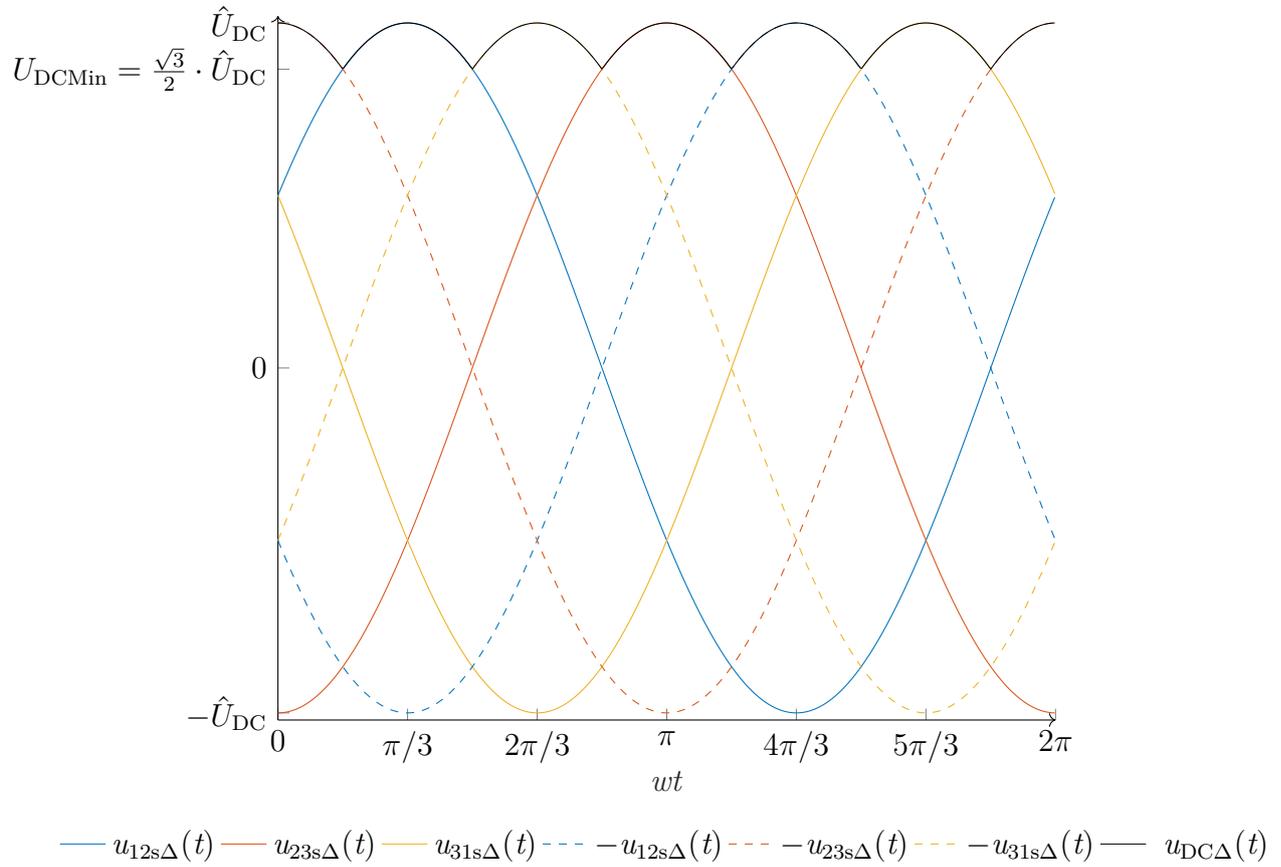


Abbildung 2.4.: Ausgangsspannung des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

2.2. Stromverläufe

2.2.1. Stromverläufe der Sekundärseite

Der Laststrom ist über eine Netzperiode konstant. Der Tiefsetzsteller regelt über seinen Tastgrad den Strom ($i_{\text{Last}\Delta}(t)$). Dadurch dass die Gleichrichterspannung ($u_{\text{DC}}(t)$) nicht konstant ist, sondern über eine Restwelligkeit verfügt, verfügt der Gleichrichterstrom ($i_{\text{DC}}(t)$) über die selbe Restwelligkeit von $2/\sqrt{3}$. Da der Elektrolyseur ein passiver Verbraucher ist, stellt sich vor dem Tiefsetzsteller aufgrund seiner Regelung, dass immer eine konstante Leistung ($P_{\text{DC}\Delta}$) entnommen wird, ein Strom ein, der denselben zeitlichen Verlauf und dieselbe Frequenz wie die Ausgangsspannung des Gleichrichters hat (siehe Abbildung 2.6).

$$i_{\text{DC}\Delta}(t) = \frac{P_{\text{DC}\Delta}}{u_{\text{DC}\Delta}(t)} \quad (2.12)$$

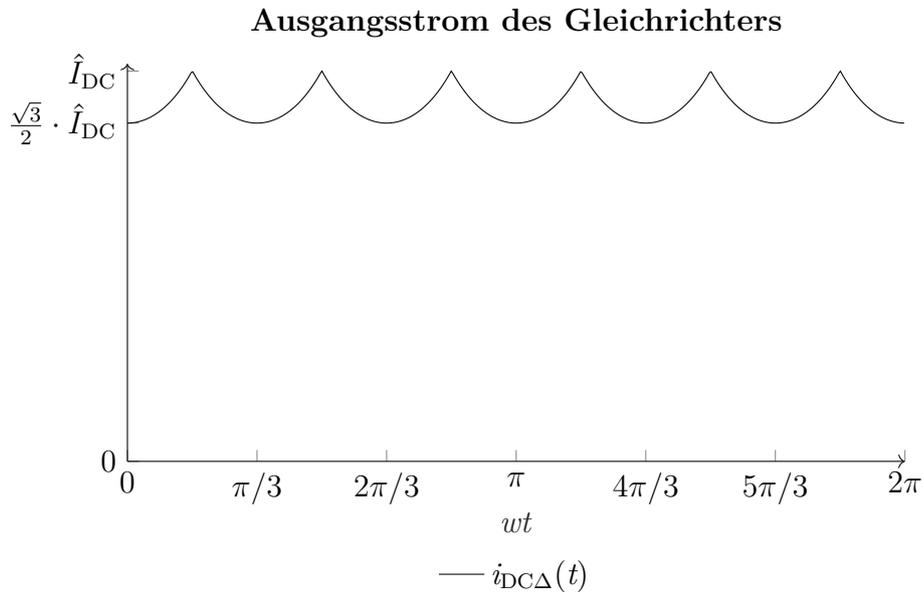


Abbildung 2.5.: Gleichrichterstrom des Dreieck-Dreieck Transformator mit 6-Puls Gleichrichter

Die sekundären Außenleiterströme ergeben sich zu:

$$i_{1s\Delta}(t) = i_{12s\Delta}(t) - i_{31s\Delta}(t) \quad (2.13)$$

$$i_{2s\Delta}(t) = i_{23s\Delta}(t) - i_{12s\Delta}(t) \quad (2.14)$$

$$i_{3s\Delta}(t) = i_{31s\Delta}(t) - i_{23s\Delta}(t) \quad (2.15)$$

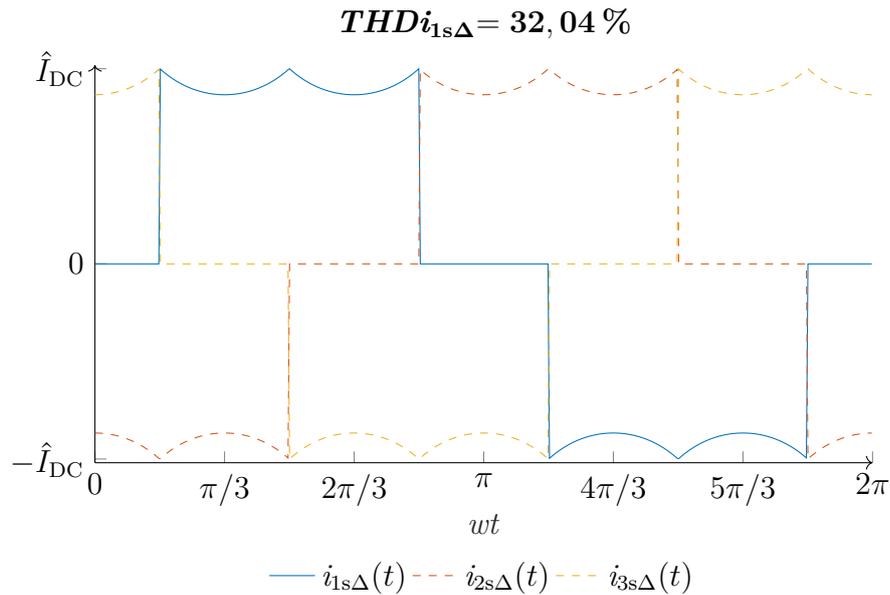


Abbildung 2.6.: Sekundäre Außenleiterströme des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

Die Dioden des Gleichrichters leiten den Strom der Phase, in der der Betrag der Spannung am höchsten ist [12]. Dementsprechend ist der Außenleiterstrom einer Phase immer Null, wenn die Dioden der anderen beiden Phasen leiten.

Aufgrund der sekundären Verschaltung des Transformators im Dreieck leitet immer nur eine Phase den Strangstrom. Der Strangstrom der anderen beiden Phasen ist in dieser Zeit Null. Der Effektivwert des primären und sekundären Strangstromes beim Dreieck-Dreieck Transformator, wird um $\sqrt{2}$ kleiner im Vergleich zum Außenleiterstrom. Dies liegt an dem unterschiedlich hohen Gesamt-Oberschwingungsgehalt des Stromes (Total Harmonic Distortion) (THDi) in den Außenleitern und den Strängen. Bei ohmscher Last würde das Verhältnis $\sqrt{3}$ betragen.

In Abbildung 2.6 ist der Graph einer Phase zur besseren Veranschaulichung durchgezogen und die anderen beiden Phasen sind gestrichelt. Diese Darstellung der Phasen wird in allen weiteren Grafiken beibehalten.

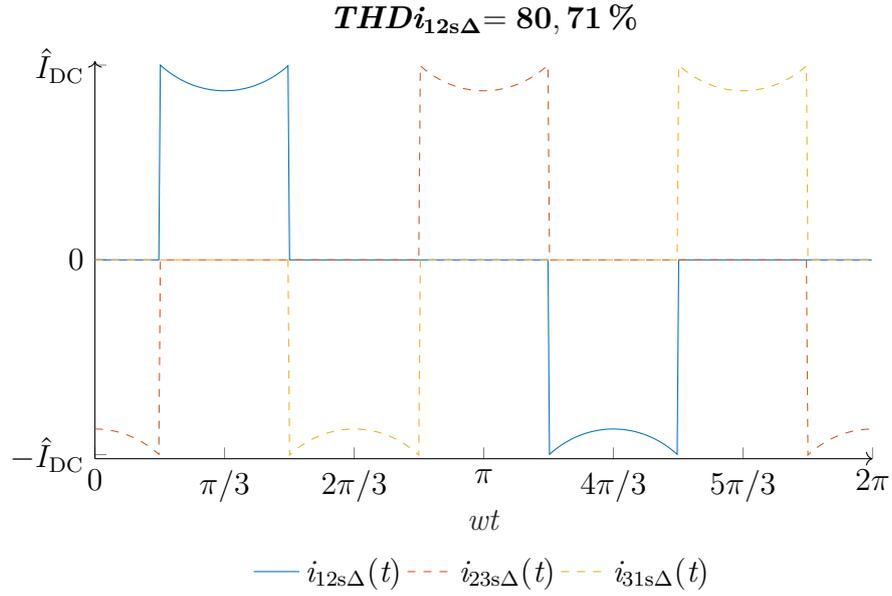


Abbildung 2.7.: Strom in der sekundären Wicklung des Transformators

Der sekundäre Strangstrom ergibt sich somit zu:

$$i_{12s\Delta}(t) = \begin{cases} i_{DC\Delta}(t) \cdot \operatorname{sgn}(u_{12s\Delta}(t)), & \text{wenn } |u_{12s\Delta}(t)| \geq \max\{|u_{23s\Delta}(t)|, |u_{31s\Delta}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{12s\Delta}(t)| < \max\{|u_{23s\Delta}(t)|, |u_{31s\Delta}(t)|\} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$i_{23s\Delta}(t) = \begin{cases} i_{DC\Delta}(t) \cdot \operatorname{sgn}(u_{23s\Delta}(t)), & \text{wenn } |u_{23s\Delta}(t)| \geq \max\{|u_{31s\Delta}(t)|, |u_{12s\Delta}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{23s\Delta}(t)| < \max\{|u_{31s\Delta}(t)|, |u_{12s\Delta}(t)|\} \end{cases} \quad (2.17)$$

$$i_{31s\Delta}(t) = \begin{cases} i_{DC\Delta}(t) \cdot \operatorname{sgn}(u_{31s\Delta}(t)), & \text{wenn } |u_{31s\Delta}(t)| \geq \max\{|u_{12s\Delta}(t)|, |u_{23s\Delta}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{31s\Delta}(t)| < \max\{|u_{12s\Delta}(t)|, |u_{23s\Delta}(t)|\} \end{cases} \quad (2.18)$$

2.2.2. Stromverläufe der Primärseite

Die sekundären Strangströme ergeben sich über das Übersetzungsverhältnis zu den primärseitigen Strangströmen.

$$i_{12p\Delta}(t) = \frac{i_{12s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.19)$$

$$i_{23p\Delta}(t) = \frac{i_{23s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.20)$$

$$i_{31p\Delta}(t) = \frac{i_{31s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (2.21)$$

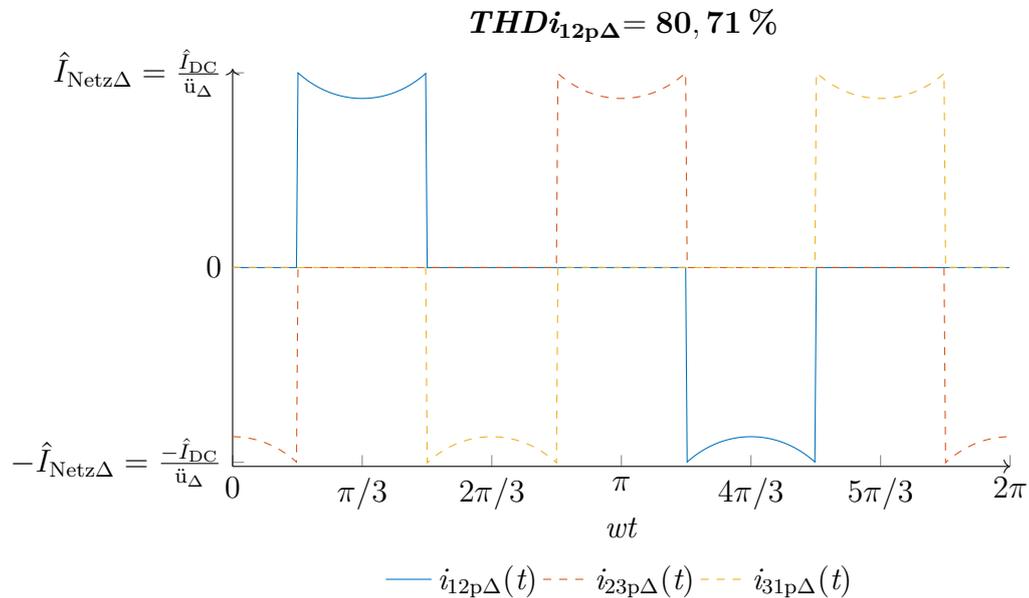


Abbildung 2.8.: Strom in der primären Wicklung des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

Der Netzstrom wird über die Knotenregel berechnet:

$$i_{1p\Delta}(t) = i_{12p\Delta}(t) - i_{31p\Delta}(t) \quad (2.22)$$

$$i_{2p\Delta}(t) = i_{23p\Delta}(t) - i_{12p\Delta}(t) \quad (2.23)$$

$$i_{3p\Delta}(t) = i_{31p\Delta}(t) - i_{23p\Delta}(t) \quad (2.24)$$

Der Effektivwert des Netzstromes beim Dreieck-Dreieck Transformator wird um $\sqrt{2}$ größer im Vergleich zum primären Strangstrom und der THDi des Außenleiterstromes ist deutlich geringer als der des Strangstromes.

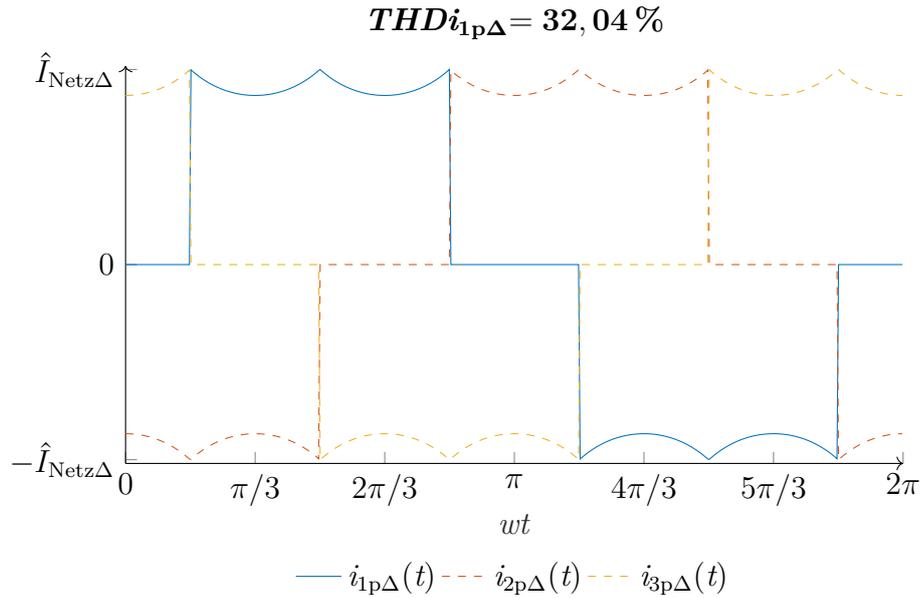


Abbildung 2.9.: Netzstrom des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

2.3. Berechnung wichtiger Kenngrößen

2.3.1. Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer

Die Optimierung der Stressgrößen des Transformators steht bei der Bachelorarbeit im Fokus. Begonnen wird dabei mit der Betrachtung der Durchlassverluste im Kupfer. Der Widerstand des Kupfers wird durch die Länge und den Querschnitt des Kabels bestimmt. Aus Gründen der Verständlichkeit wird in den folgenden Berechnungen nur eine Phase betrachtet.

Die Längen der Wicklungen ergeben sich immer aus dem Übersetzungsverhältnis (\ddot{u}_Δ) (siehe Formel 2.7).

$$l_{s\Delta} = \frac{l_{p\Delta}}{\ddot{u}_\Delta} \quad (2.25)$$

Die Stromverläufe der Primär- und Sekundärseite haben denselben Verlauf. Der Querschnitt des Kupferdrahtes wird entsprechend dem Übersetzungsverhältnis größer gewählt, um primär und sekundär eine Kupferverteilung von 50:50 zu haben (T-Symmetrie)[14].

$$A_{s\Delta} = \ddot{u}_\Delta \cdot A_{p\Delta} \quad (2.26)$$

Der Durchlasswiderstand des Kupfers ergibt sich somit zu:

$$R_{s\Delta} = \frac{l_{s\Delta}}{A_{s\Delta}} = \frac{l_{p\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}} = \frac{R_{p\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}^2} \quad (2.27)$$

Der Effektivwert des Stromes berechnet sich wie folgt, hier am Beispiel des sekundären Strangstromes gezeigt:

$$I_{12s\Delta} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (i_{12s\Delta}(t))^2 dt} \quad (2.28)$$

Es ergibt sich für die sekundären Durchlassverluste eines Schenkels folgendes:

$$P_{vs\Delta} = R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (2.29)$$

Die primären Durchlassverluste im Kupfer eines Schenkels sind:

$$P_{vp\Delta} = R_{p\Delta} \cdot I_{12p\Delta}^2 = \ddot{u}_{\Delta}^2 \cdot R_{s\Delta} \cdot \left(\frac{I_{12s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}}\right)^2 = R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (2.30)$$

Die gesamten Durchlassverluste im Kupfer summieren sich somit auf:

$$P_{12vCu\Delta} = P_{vp\Delta} + P_{vs\Delta} = R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 + R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 2 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (2.31)$$

2.3.2. Berechnung des Gesamt-Oberschwingungsgehaltes des Stromes

Zur Bestimmung der im Strom hauptsächlich vorkommenden Frequenzen und ihrer Amplituden wird der jeweilige Stromverlauf mit Hilfe der Diskrete Fourier Transformation (DFT) in einem diskreten, periodischen Frequenzspektrum abgebildet. Der Strom wird über den Zeitraum von einer Periode (T) betrachtet.

$$I_{[k]} = \sum_{t=0}^{T-1} i_{[t]} \cdot e^{-j2\pi kt \cdot \frac{1}{T}} \quad \text{für } k = 0, \dots, T-1 \quad (2.32)$$

Der Gesamtstrom der Harmonischen entspricht:

$$I_{\text{hges}} = \sqrt{\sum_{h=2}^n (I_{[k]})^2} \quad (2.33)$$

und I_f ist der Strom der Grundschwingung ($k = 1$). In den Grafiken ist der THDi der jeweiligen Ströme als Überschrift angegeben.

Aus der DFT des Stromes kann nun der THDi[15] wie folgt berechnet werden:

$$THDi = \frac{\sqrt{I_{\text{hges}}^2}}{I_f} \cdot 100\% \quad (2.34)$$

2.3.3. Betrachtung der Phasenlage der Netzspannung und des primären Außenleiterstromes

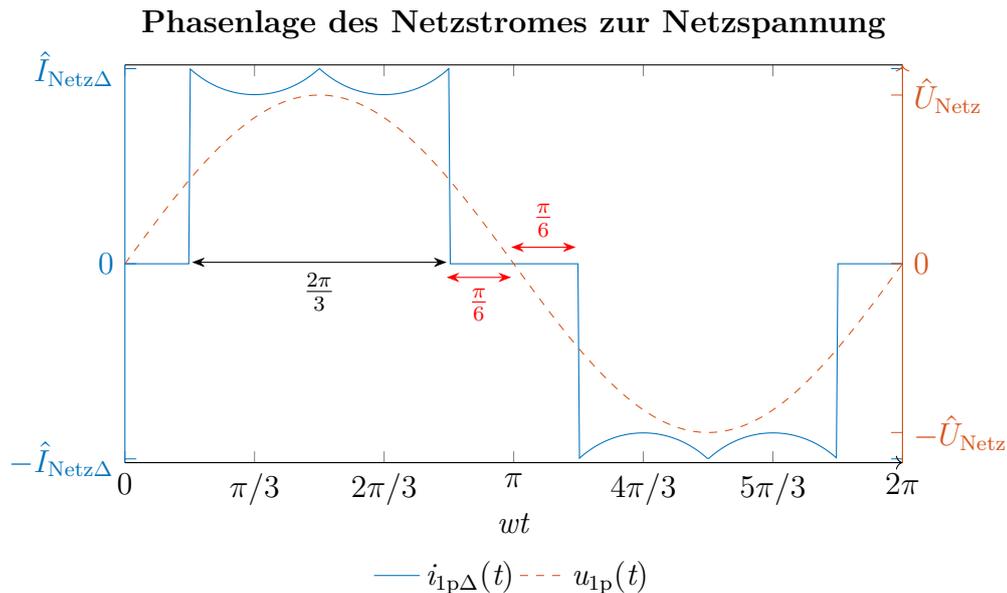


Abbildung 2.10.: Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung

In Abbildung 2.10 ist der Netzstrom und die Netzspannung in der ersten Phase dargestellt. Durch die Verschaltung des Transformators, sowohl primär, als auch sekundär im Dreieck, weisen die Außenleiterströme die identischen Strom- und Spannungsverläufe auf. Der Stromverlauf hat 6 Stufen in einer Netzperiode, wobei zu betrachten ist, dass die Stufen des Netzstromes dieselbe Höhe aufweisen. Zwischen den Maxima des Netzstromes liegt eine Stufe. Diese ergibt sich aufgrund dessen, dass jede Diode der positiven und negativen Gleichrichter-Brückenhälfte den Strom für $1/3$ der Netzperiode führt. Es verbleiben daher im Phasenstrom in der Umgebung der Nulldurchgänge $\pi/3$ breite stromlose Intervalle, welche für einen relativ hohen Anteil an niederfrequenten Oberschwingungen im Netzstrom sorgen. Vor allem die 5te und 7te Harmonische sind sehr dominant.

Außerdem ist der THDi des Strangstromes beim Dreieck-Dreieck Transformator wesentlich höher, als der THDi des Netzstromes. Das hat zur Folge, dass der Transformator weniger effizient ist, da er höhere Verluste aufweist. Dieser Zusammenhang wird im nächsten Unterkapitel näher betrachtet.

Die Phasenverschiebung des Außenleiterstromes zur Netzspannung ist $\phi = 0^\circ$. Daher ist eine passive Blindleistungskompensation hier nicht zu empfehlen.

2.3.4. Berechnung der Nennleistung des Transformators

Die Nennleistung eines Transformators entspricht üblicherweise der abgegebenen Leistung. Sie wird im Dauerbetrieb gemessen und ist die maximale Leistung, die ohne zeitliche Einschränkungen erbracht werden kann. Die Nennleistung wird für lineare Strom- und Spannungsverläufe bestimmt und entspricht der Dauerleistung. Aufgrund des Gleichrichters, welcher an die Außenleiter des Transformators angeschlossen wird, ist das hier nicht mehr gegeben. Die Harmonischen erhöhen den Strom und somit muss die Dauerleistung des Transformators für die Anwendung erhöht werden. Es werden in diesem Fall nur die Effektivwerte betrachtet, Wirbelströme, Skin-Effekte usw. werden für die Berechnungen vernachlässigt. Die Dimensionierung der erforderlichen Dauerleistung des Dreieck-Dreieck Transformators orientiert sich an den Strangströmen. Sie weisen sowohl primär, als auch sekundär einen THDi von 80,71 % auf. Der normierte Strangstrom der Harmonischen entspricht somit primär und sekundär:

$$I_{\text{hges}\Delta} = 0,8071 \cdot I_f \quad (2.35)$$

Wobei der normierte Wert $I_{\text{hges}\Delta}$ dem Wert des THDi entspricht. Daraus ergibt sich eine Zusatzbelastung der Leiter durch die Strangströme um 28,5 %:

$$I_{12\text{ges}\Delta} = \sqrt{I_f^2 + I_{\text{hges}\Delta}^2} = 1,285 \cdot I_f [16] \quad (2.36)$$

Der Transformator muss dementsprechend überdimensioniert werden, sodass die nominelle Dauerleistung 128,5 % der Lastleistung entspricht. An einem Beispiel erklärt, will man eine Leistung von 1 MW zum Elektrolyseur übertragen, muss ein Dreieck-Dreieck Transformator mit einer Nennleistung von 1,285 MW gekauft werden. Zu Beachten ist auch, dass der Transformator dieselben Verluste wie bei 1,285 MW ohmscher Belastung aufweist.

3. Dreieck-Stern Transformator

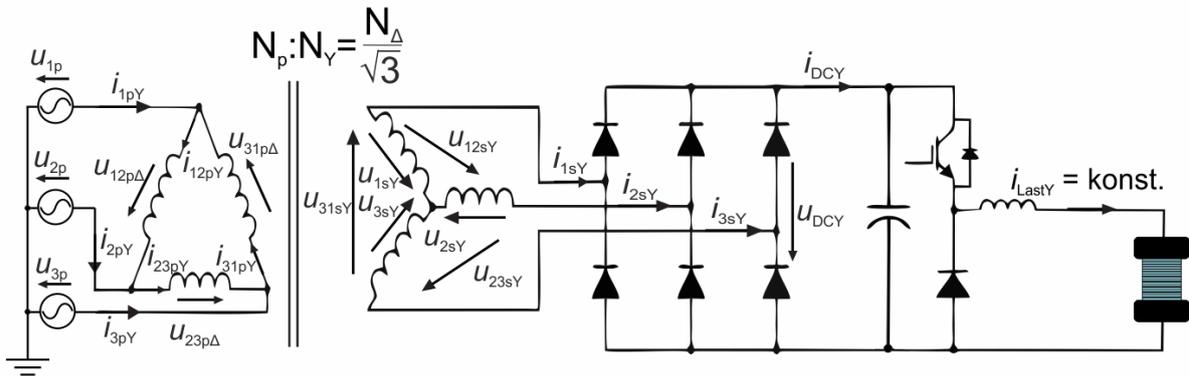


Abbildung 3.1.: Dreieck-Stern Transformator mit 6-Puls Gleichrichter und Tiefsetzsteller

3.1. Spannungsverläufe

3.1.1. Die Spannungsverläufe der Primärseite

Es werden die gleichen primären Spannungsverläufe angenommen wie beim Dreieck-Dreieck Transformator.

Um identische große sekundäre Außenleiterspannungen zu erreichen, wird das Übersetzungsverhältnis des Dreieck-Stern Transformators wie folgt gewählt:

$$\ddot{u}_Y = \frac{N_p}{N_Y} = \frac{\ddot{u}_\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.37)$$

Wobei die sekundäre Windungsanzahl des Dreieck-Stern Transformators (N_Y) um den Faktor $\sqrt{3}$ kleiner gewählt ist als die sekundäre Windungsanzahl (N_Δ) des Dreieck-Dreieck Transformators.

3.1.2. Die Spannungsverläufe der Sekundärseite

Die sekundären Außenleiterspannungen ergeben sich aus den primären Strangspannungen über das Übersetzungsverhältnis:

$$u_{1sY}(t) = \frac{u_{12p\Delta}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.38)$$

$$u_{2sY}(t) = \frac{u_{23p\Delta}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.39)$$

$$u_{3sY}(t) = \frac{u_{31p\Delta}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.40)$$

Die sekundären Strangspannungen des Dreieck-Stern Transformators ergeben sich über die Maschenregel:

$$u_{12sY}(t) = u_{1sY}(t) - u_{2sY}(t) = 3 \cdot \frac{\hat{U}_{\text{Netz}}}{\ddot{u}_Y} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.41)$$

$$u_{23sY}(t) = u_{2sY}(t) - u_{3sY}(t) = 3 \cdot \frac{\hat{U}_{\text{Netz}}}{\ddot{u}_Y} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \quad (3.42)$$

$$u_{31sY}(t) = u_{3sY}(t) - u_{1sY}(t) = 3 \cdot \frac{\hat{U}_{\text{Netz}}}{\ddot{u}_Y} \cdot \sin(\omega t + \pi) \quad (3.43)$$

Die Ausgangsspannung (u_{DCY}) berechnet sich über die Formel 2.11 aus dem Unterkapitel 2.1.2. In Abbildung 3.2 sind die Eingangsspannungen der 6-Puls-Gleichrichter dargestellt. In der Grafik ist die Verschiebung der Strangspannung um $\pi/6$ gegenüber der Außenleiterspannung des 6-Puls Gleichrichters gut ersichtlich.

Die Leistung am Ausgang des Tiefsetzstellers des Dreieck-Stern Transformators (P_{DCY}) ist wie beim Dreieck-Dreieck Transformator konstant.

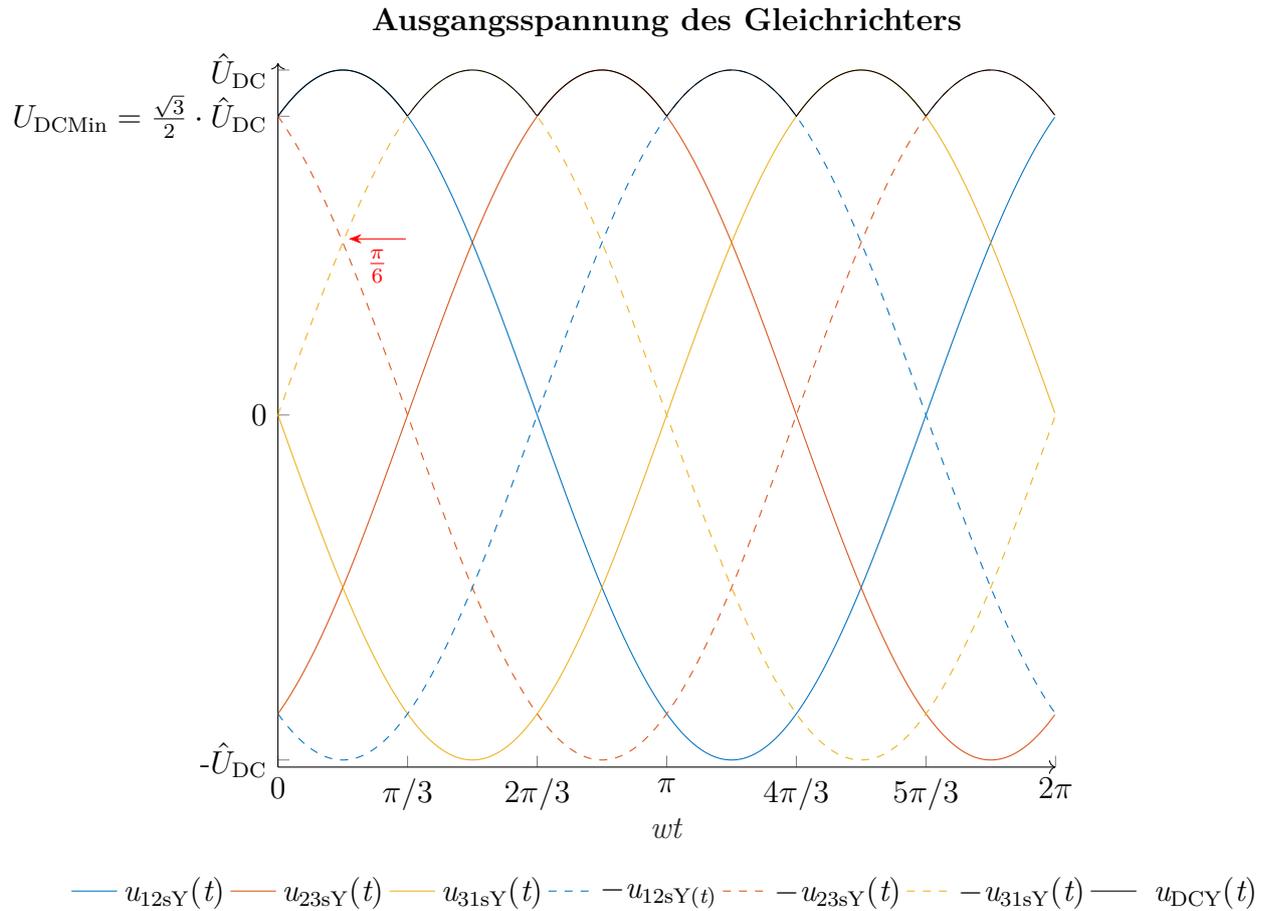


Abbildung 3.2.: Spannungen am 6-Puls Gleichrichter des Dreieck-Stern Transformators

3.2. Stromverläufe

3.2.1. Stromverläufe der Sekundärseite

Wie beim Dreieck-Dreieck Transformator ergibt sich der Gleichrichterstrom hier zu:

$$i_{\text{DCY}}(t) = \frac{P_{\text{DCY}}}{u_{\text{DCY}}(t)} \quad (3.44)$$

Das Maximum des Gleichrichterstromes stellt sich bei der Minimalspannung des Gleichrichters ein, was dem Zeitpunkt entspricht, indem die Diode kommutiert.

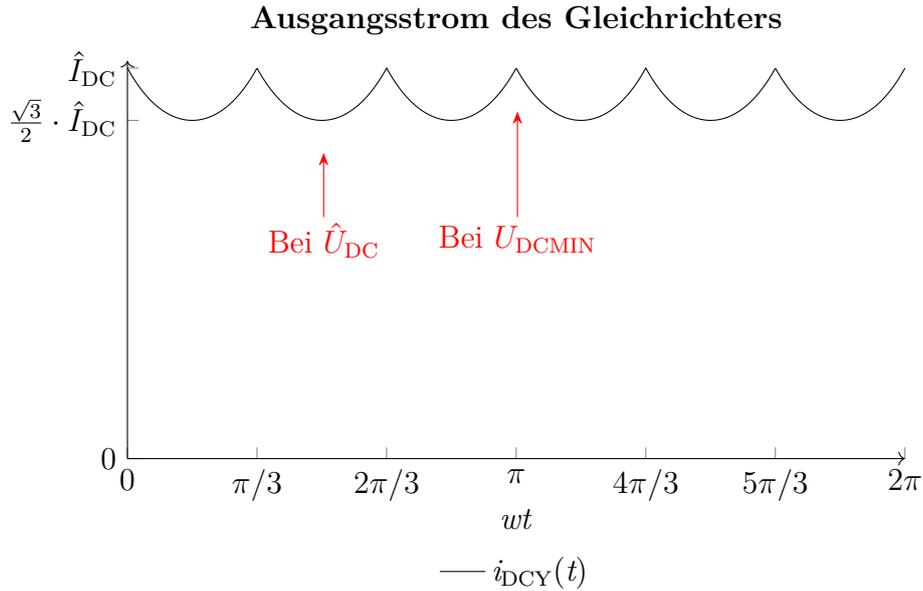


Abbildung 3.3.: Strom am Ausgang des 6-Puls Gleichrichters
bei konstanter Leistung der Last

Der Außenleiterstrom ist gleich dem Strangstrom im Stern und berechnet sich wie folgt:

$$i_{1sY}(t) = \begin{cases} i_{DC}(t) \cdot \text{sgn}(u_{12sY}(t)), & \text{wenn } |u_{12sY}(t)| \geq \max\{|u_{23sY}(t)|, |u_{31sY}(t)|\} \\ & \text{oder } |u_{31sY}(t)| \leq \min\{|u_{12sY}(t)|, |u_{23sY}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{23sY}(t)| > \max\{|u_{31sY}(t)|, |u_{12sY}(t)|\} \end{cases} \quad (3.45)$$

$$i_{2sY}(t) = \begin{cases} i_{DC}(t) \cdot \text{sgn}(u_{23sY}(t)), & \text{wenn } |u_{23sY}(t)| \geq \max\{|u_{12sY}(t)|, |u_{31sY}(t)|\} \\ & \text{oder } |u_{12sY}(t)| \leq \min\{|u_{23sY}(t)|, |u_{31sY}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{31sY}(t)| > \max\{|u_{12sY}(t)|, |u_{23sY}(t)|\} \end{cases} \quad (3.46)$$

$$i_{3sY}(t) = \begin{cases} i_{DC}(t) \cdot \text{sgn}(u_{31sY}(t)), & \text{wenn } |u_{31sY}(t)| \geq \max\{|u_{12sY}(t)|, |u_{23sY}(t)|\} \\ & \text{oder } |u_{23sY}(t)| \leq \min\{|u_{12sY}(t)|, |u_{31sY}(t)|\} \\ 0, & \text{wenn } |u_{12sY}(t)| > \max\{|u_{23sY}(t)|, |u_{31sY}(t)|\} \end{cases} \quad (3.47)$$

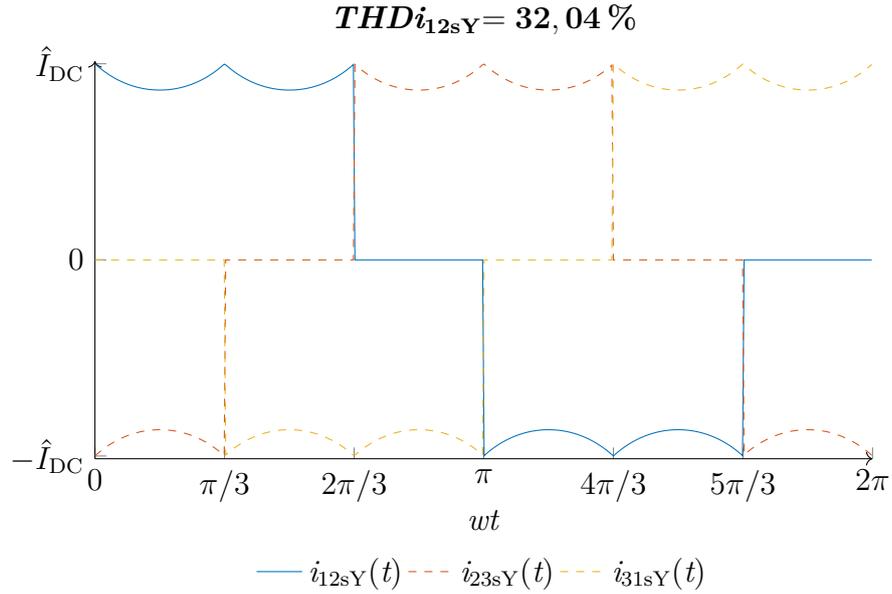


Abbildung 3.4.: Strom in der sekundären Wicklung des Dreieck-Stern Transformators

3.2.2. Stromverläufe der Primärseite

Die sekundären Außenleiterströme ergeben sich über das Übersetzungsverhältnis zu den primären Strangströmen:

$$i_{12pY}(t) = \frac{i_{1sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.48)$$

$$i_{23pY}(t) = \frac{i_{2sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.49)$$

$$i_{31pY}(t) = \frac{i_{3sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (3.50)$$

Der Netzstrom ergibt sich somit zu:

$$i_{1pY}(t) = i_{12pY}(t) - i_{31pY}(t) \quad (3.51)$$

$$i_{2pY}(t) = i_{23pY}(t) - i_{12pY}(t) \quad (3.52)$$

$$i_{3pY}(t) = i_{31pY}(t) - i_{23pY}(t) \quad (3.53)$$

Der THDi des Netzstromes des Dreieck-Stern Transformators entspricht exakt dem THDi des Netzstromes des Dreieck-Dreieck Transformators. Sehr interessant ist zudem, dass der Effektivwert des Außenleiterstroms primärseitig beim Dreieck-Stern Transformator, um $\sqrt{3}$ größer wird im Vergleich zum Strangstrom. Somit verhält sich der Effektivwert des Stromes wie bei einer ohmschen Last. Dies lässt sich darauf zurück führen, dass der Netzstrom und der Strangstrom beim Dreieck-Stern Transformator denselben THDi von 32,04% haben.

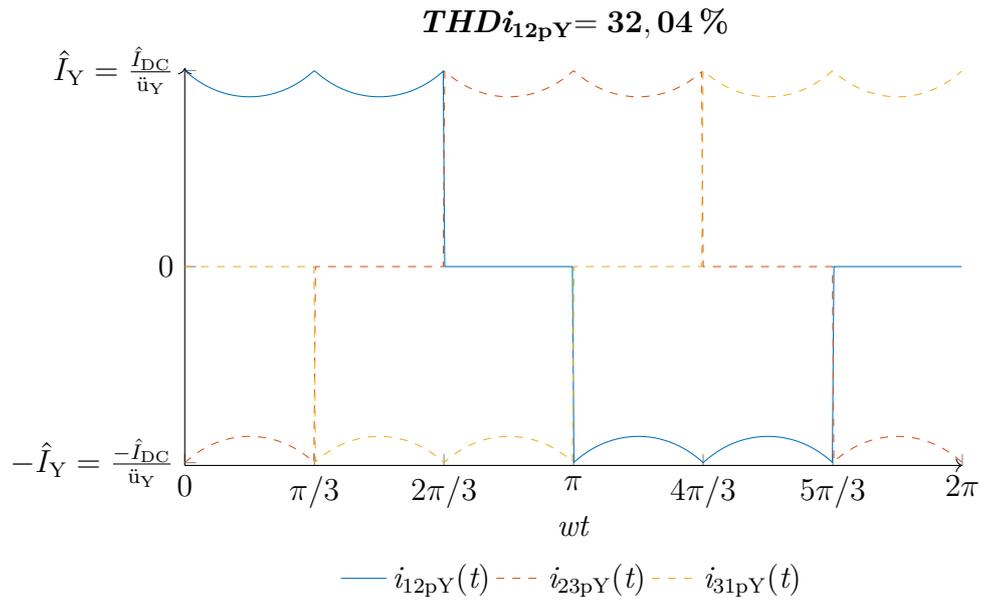


Abbildung 3.5.: Strom in der primären Wicklung des Dreieck-Stern Transformators

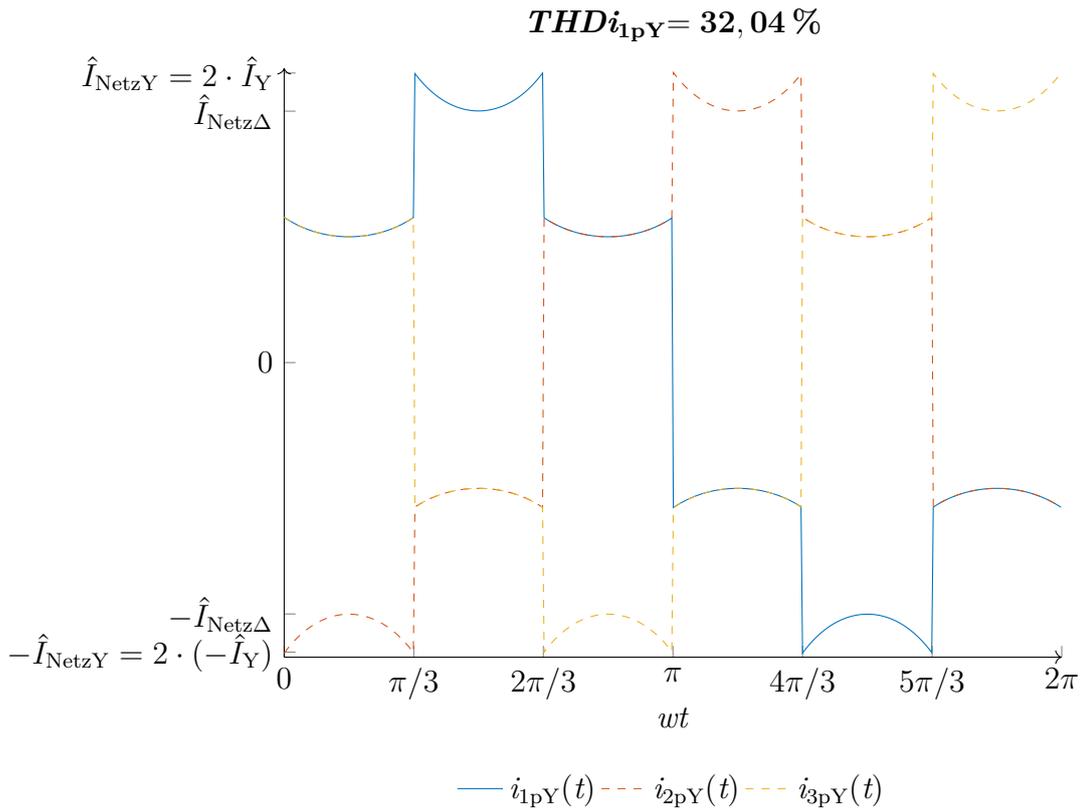


Abbildung 3.6.: Netzstrom des Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

3.3. Berechnung wichtiger Kenngrößen

3.3.1. Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer

Das Übersetzungsverhältnis der beiden sekundären Wicklungen zueinander ist:

$$\ddot{u}_{\Delta Y} = \frac{N_{\Delta}}{N_Y} = \sqrt{3} \quad (3.54)$$

Für die Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer des Dreieck-Stern Transformators wird aus Gründen der Verständlichkeit nur eine Phase betrachtet. Werden die sekundären Widerstände entsprechend Formel 3.54 gleichgesetzt, erhält man das Verhältnis:

$$R_{sY} = \frac{l_{sY}}{A_{sY}} = \frac{\frac{l_{s\Delta}}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3} \cdot A_{s\Delta}} = \frac{1}{3} \cdot R_{s\Delta} \quad (3.55)$$

Bei der Betrachtung der sekundären Stromflüsse fällt auf, dass bei dem Dreieck-Stern Transformator sekundärseitig immer zwei Wicklungen stromführend sind. Bei der Dreiecksschaltung führt immer nur eine Wicklung den Strom.

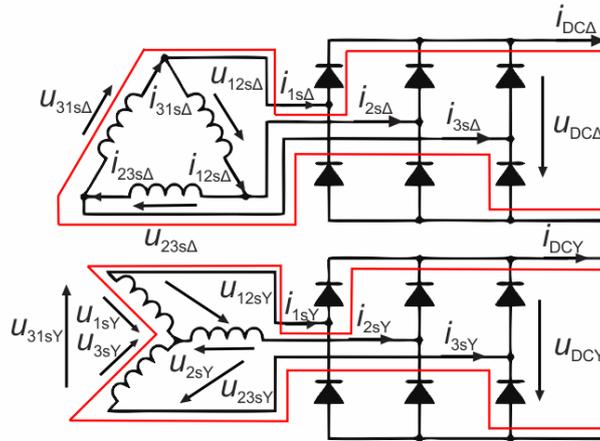


Abbildung 3.7.: Sekundärer Strompfad im Stern und im Dreieck

Um die Durchlassverluste im Kupfer in ein Verhältnis setzen zu können wird derselbe Strangstrom wie beim Dreieck-Dreieck Transformator angenommen ($I_{12s\Delta} = I_{12sY}$).

Es ergeben sich die sekundären Durchlassverluste eines Schenkels somit zu:

$$P_{vsY} = 2 \cdot R_{sY} \cdot I_{12sY}^2 = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = \frac{2}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (3.56)$$

Formel 3.56 ergibt sich, da der Widerstand von beiden Wicklungen in die Durchlassverluste einfließt. Dies wird in Abbildung 3.7 noch einmal anschaulich dargestellt. In der Grafik sind die Strompfade einmal beispielhaft für einen der 6 Fälle dargestellt. Auf diesen Zusammenhang hat mich mein Betreuer M. Sc. Roland Unruh aufmerksam gemacht.

Betrachtet man nur die Sekundärseite wie in Formel 3.56, offenbart sich daraus, dass die Sekundärseite im Stern 1/3 weniger Verluste verursacht.

Primär ergeben sich die Durchlassverluste eines Schenkels zu:

$$P_{vpY} = 2 \cdot R_{p\Delta} \cdot I_{12p\Delta}^2 = 2 \cdot \ddot{u}_Y^2 \cdot R_{sY} \cdot \left(\frac{I_{12s\Delta}}{\ddot{u}_Y}\right)^2 = \frac{2}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (3.57)$$

Die gesamten Durchlassverluste im Kupfer summieren sich somit auf zu:

$$P_{12vCuY} = P_{vpY} + P_{vsY} = \frac{2}{3} R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 + \frac{2}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 0,6667 \cdot P_{12vCu\Delta} \quad (3.58)$$

Als Ergebnis erhält man, dass der Dreieck-Stern Transformator nur 2/3 der Durchlassverluste im Kupfer aufweist, wie der Dreieck-Dreieck Transformator. Dies kommt dadurch, dass sowohl die sekundäre Wicklung, als auch die primäre Wicklung des Dreieck-Stern Transformators 1/3 weniger Verluste verursachen, als die des Dreieck-Dreieck Transformators. Wählt man den Strangstrom sekundär $\sqrt{3}/\sqrt{2}$ größer als beim Dreieck-Dreieck Transformator, weisen beide Transformatoren die gleichen Durchlassverluste im Kupfer auf. Es kann dementsprechend eine 22,47 % größere Leistung aus dem gleichen Material (selber Kern und selbe Menge Kupfer) entnommen werden. Dies gilt nicht nur für den hier behandelten Fall, sondern für jede Last deren Leistungsaufnahme ausschließlich von $u_{DCY}(t)$ abhängt.

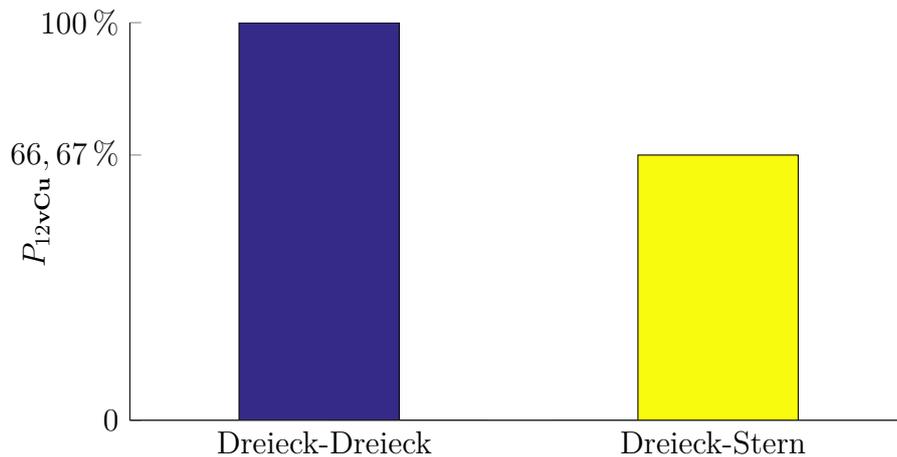


Abbildung 3.8.: Vergleich der Durchlassverluste der beiden Transformatoren mit 6-Puls Gleichrichter bei gleichem sekundären Strangstrom

3.3.2. Betrachtung des Amplitudenspektrums des Netzstromes

Die Grundfrequenz (f) entspricht der Netzfrequenz ($f = 50 \text{ Hz}$) und die Oberschwingungen ($n \cdot f$) bestehen aus ungeraden Harmonischen, welche keine ganzzahligen Vielfachen von 3 sind (5, 7, 11, 13, ...). Die normierten Amplitudenspektren des Dreieck-Dreieck Transformators und des Dreieck-Stern Transformators sind identisch.

Normiertes Amplitudenspektrum des Netzstromes des 6-Puls Gleichrichters

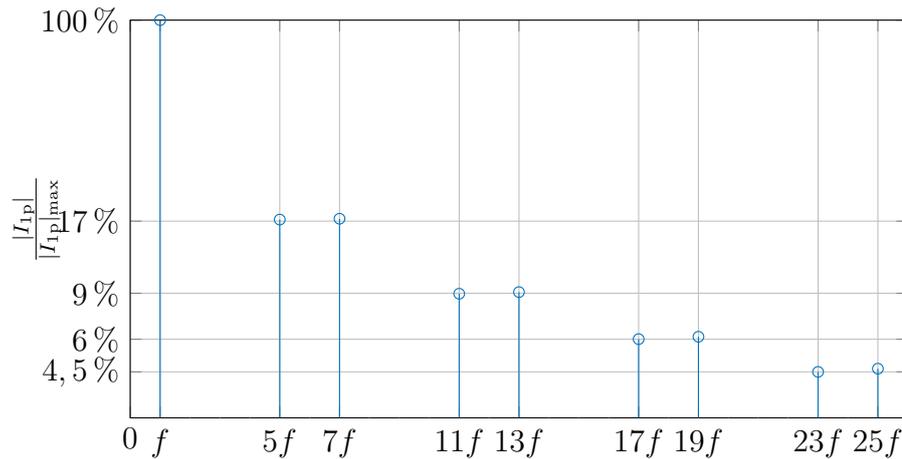


Abbildung 3.9.: Normiertes Amplitudenspektrum des Dreieck-Dreieck- und Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

3.3.3. Betrachtung der Phasenlage der Netzspannung und des primären Außenleiterstromes

In Abbildung 3.10 ist der Netzstrom und die Netzspannung in der ersten Phase dargestellt. Im Netzstrom des Dreieck-Stern Transformators verbleiben keine stromlosen Intervalle wie beim Dreieck-Dreieck Transformator. Der Stromverlauf des 6-Puls Gleichrichters mit Dreieck-Stern Transformator hat ebenfalls 6 Stufen innerhalb einer Netzperiode. Allerdings weist der Netzstrom eine Stufe mehr (2 Stufen) zwischen den Maxima auf, als beim 6-Puls Gleichrichter mit Dreieck-Dreieck Transformator, weshalb er einen vermeintlich sinusförmigeren Verlauf hat, als der Netzstrom des 6-Puls Gleichrichters mit Dreieck-Dreieck Transformator. Die Stufen sind unterschiedlich hoch und weisen einen sehr steilen Nulldurchgang auf. Durch Betrachtung des Amplitudenspektrums im Unterkapitel 3.3.2 wurde bereits bewiesen, dass sowohl die Netzströme des Dreieck-Dreieck- als auch die Netzströme des Dreieck-Stern Transformators dieselbe harmonische Verzerrung aufweisen. Die Strom- und Spannungsverläufe haben eine Phasenverschiebung von $\phi = 0^\circ$, wie beim Dreieck-Dreieck Transformator.

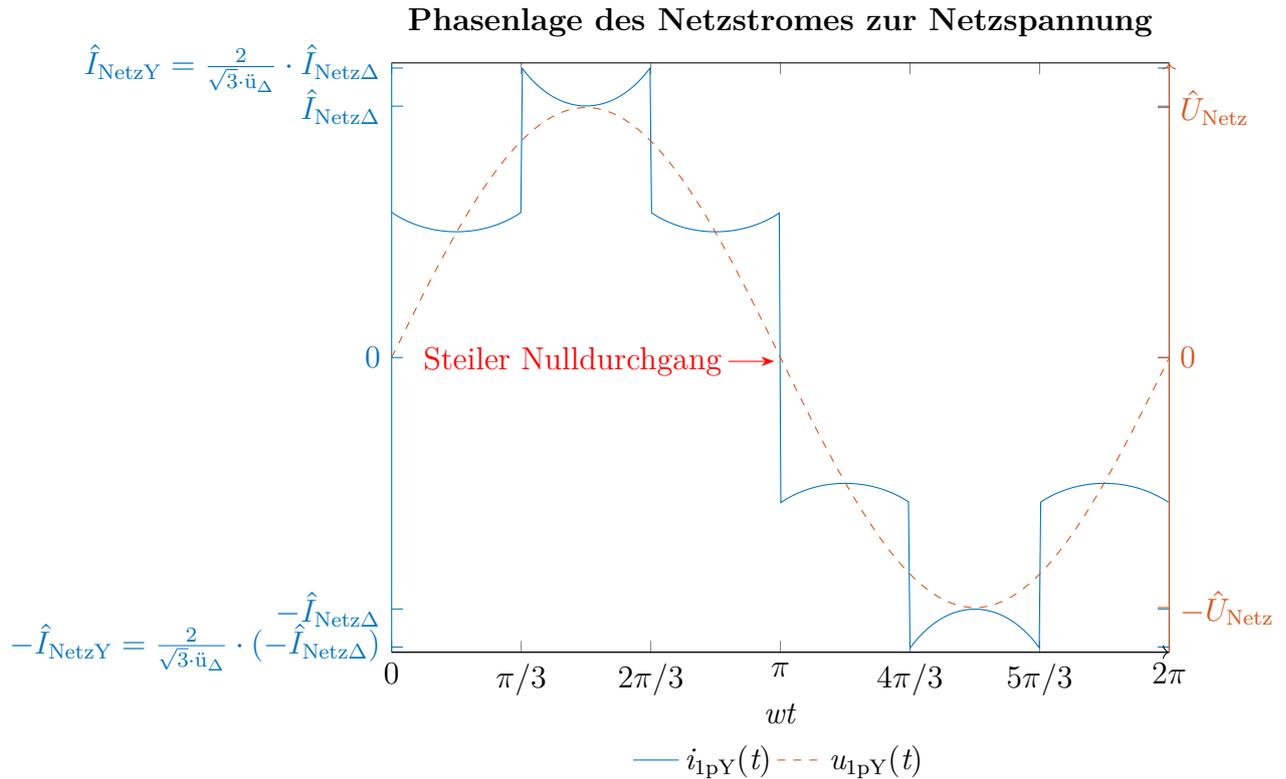


Abbildung 3.10.: Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung

3.3.4. Berechnung der Nennleistung des Transformators

Der Dreieck-Stern Transformator hat sowohl primär, als auch sekundär einen THDi von 32,04% in den Strangströmen. Der normierte Strangstrom der Harmonischen entspricht somit primär und sekundär:

$$I_{\text{hgesY}} = 0,3204 \cdot I_f \quad (3.59)$$

Wobei der normierte Wert I_{hgesY} dem Wert der THDi entspricht. Daraus ergibt sich eine Zusatzbelastung der Leiter durch die Strangströme um 5%:

$$I_{12\text{gesY}} = \sqrt{I_f^2 + I_{\text{hgesY}}^2} = 1,05 \cdot I_f \quad (3.60)$$

Der Transformator muss dementsprechend überdimensioniert werden, dass die nominelle Dauerleistung 105% der Lastleistung entspricht. Die Netzströme beider Transformatoren haben denselben THDi und bei beiden entstehen am Gleichrichter und Tiefsetzsteller die gleichen Verluste, aber die erforderliche Überdimensionierung des Dreieck-Stern Transformators ist deutlich kleiner, als die des Dreieck-Dreieck Transformators. Deshalb ist der Dreieck-Stern Transformator bei einer Verwendung mit 6-Puls-Gleichrichtern sekundär, dem Dreieck-Dreieck Transformator vorzuziehen!

4. Dreieck-Dreieck-Stern Transformator

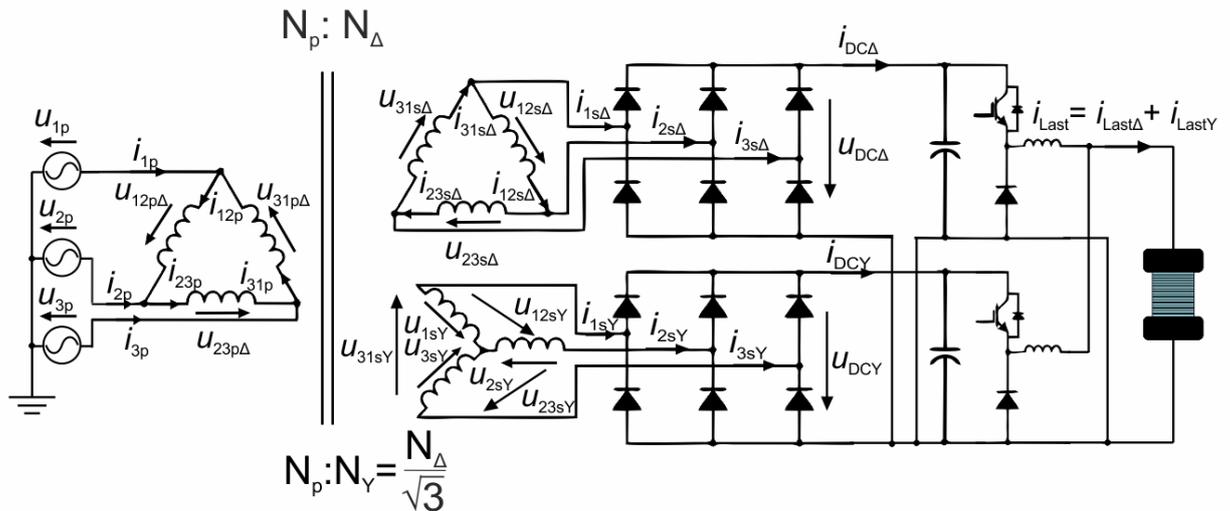


Abbildung 4.1.: Dreieck-Dreieck-Stern Transformator mit 12-Puls Gleichrichter und 2 unabhängigen Tiefsetzstellern

In den Kapiteln 2 und 3 wurden 6-Puls Gleichrichter behandelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem 12-Puls Gleichrichter aus Abbildung 4.1. Der Dreieck-Dreieck Transformator und der Dreieck-Stern Transformator mit ihren jeweiligen 6-Puls Gleichrichtern werden primär parallel geschaltet, um eine Verbesserung des THDi des Netzstromes zu erreichen.

4.1. Spannungsverläufe

Die Spannungsverläufe entsprechen primär und sekundär denen des Dreieck-Dreieck Transformators und des Dreieck-Stern Transformators. Die sekundäre Verschaltung im Dreieck und im Stern bewirkt eine natürliche Verschiebung der erzeugten Strangspannungen von $\pi/6$, wobei die sekundären Strangspannungen im Dreieck, denen im Stern um $\pi/6$ nacheilen [17]. Auch beim Dreieck-Dreieck-Stern Transformator mit 12-Puls Gleichrichter ist die Leistung am Ausgang der beiden Tiefsetzsteller konstant.

4.2. Stromverläufe

4.2.1. Stromverläufe der Sekundärseite

Die Stromverläufe der Sekundärwindung des Dreiecks entsprechen den sekundären Stromverläufen des Dreieck-Dreieck Transformators und die Stromverläufe der Sekundärwindung im Stern entsprechen den sekundären Stromverläufen des Dreieck-Stern Transformators (Unterkapitel 2.2.1 und 3.2.1).

4.2.2. Stromverläufe der Primärseite

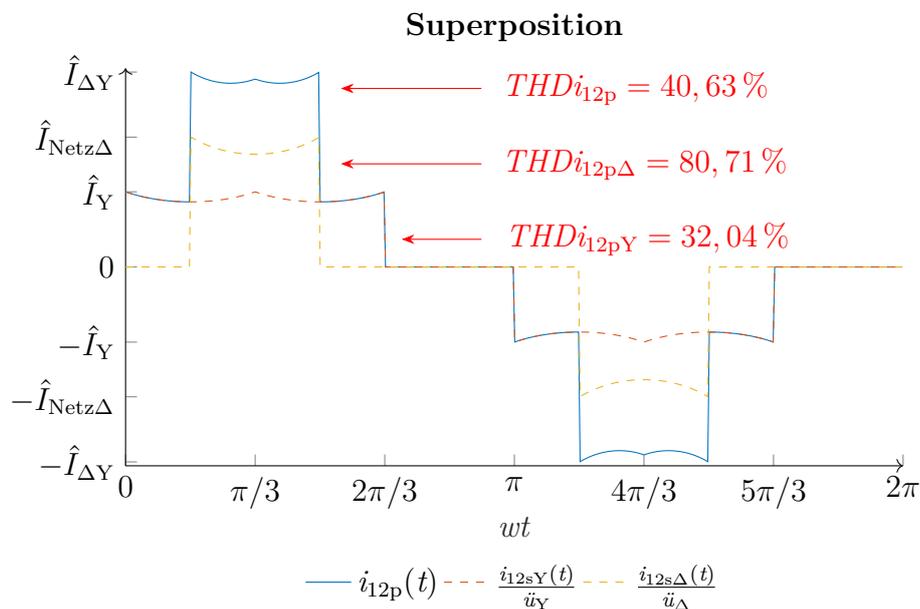


Abbildung 4.2.: Superposition der beiden primären Strangströme

In Abbildung 4.2 ist die Superposition der primären Strangströme für eine Phase dargestellt. Die sekundäre Leistungsaufteilung in der Grafik 4.2 entspricht 50:50. Weshalb dieses Leistungsverhältnis angenommen wird, wird im Unterkapitel 4.3.1 noch genauer behandelt. Es fällt auf, dass der THDi des Strangstromes höher ist als beim Dreieck-Stern Transformator (siehe Abbildung 4.3). Dies liegt am Einfluss der sekundär im Dreieck geschalteten Wicklung deren hoher Oberschwingungsgehalt sich negativ auf die primäre Wicklung auswirkt. Dementsprechend ist der THDi des primären Strangstromes auch höher als der des Netzstromes.

Die Strangströme primär ergeben sich aus der Superposition der beiden primären Ströme:

$$i_{12p}(t) = \frac{i_{12s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} + \frac{i_{12sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (4.61)$$

$$i_{23p}(t) = \frac{i_{23s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} + \frac{i_{23sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (4.62)$$

$$i_{31p}(t) = \frac{i_{31s\Delta}(t)}{\ddot{u}_{\Delta}} + \frac{i_{31sY}(t)}{\ddot{u}_Y} \quad (4.63)$$

Der Netzstrom ergibt sich somit zu:

$$i_{1p}(t) = i_{12p}(t) - i_{31p}(t) \quad (4.64)$$

$$i_{2p}(t) = i_{23p}(t) - i_{12p}(t) \quad (4.65)$$

$$i_{3p}(t) = i_{31p}(t) - i_{23p}(t) \quad (4.66)$$

und ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

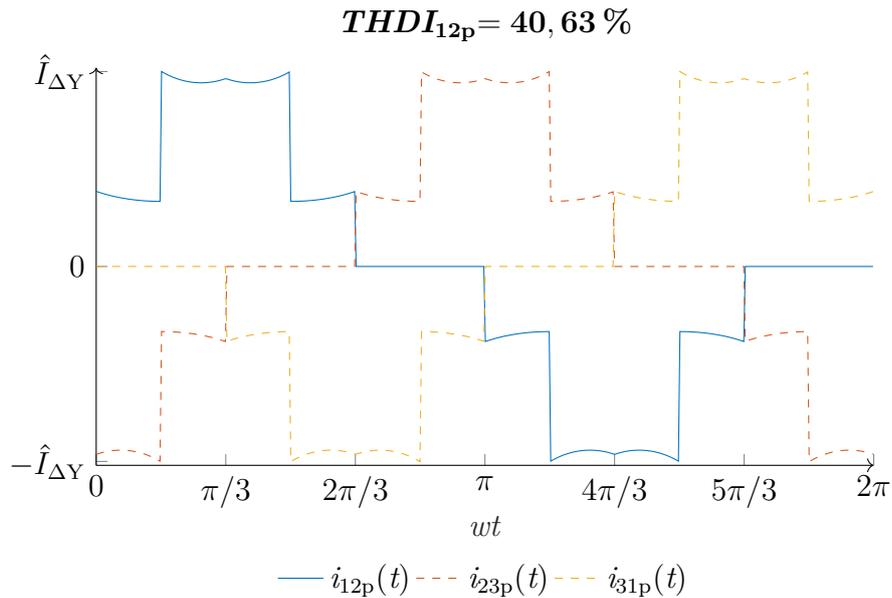


Abbildung 4.3.: Darstellung der primären Strangströme des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter

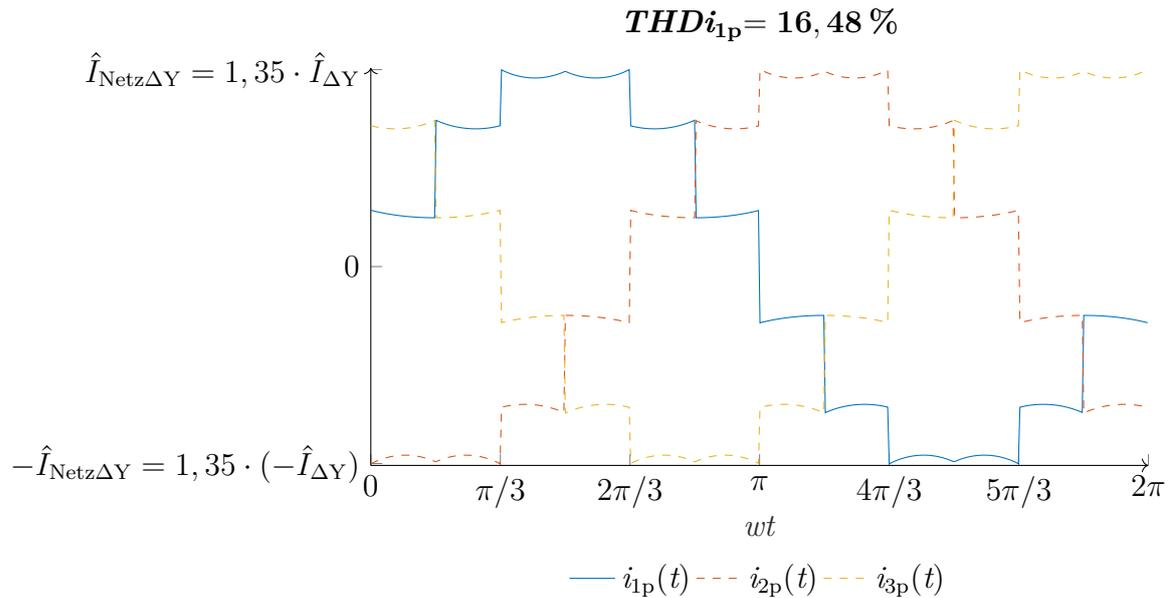


Abbildung 4.4.: Netzstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter

4.3. Berechnung wichtiger Kenngrößen

4.3.1. Betrachtung des Gesamt-Oberschwingungsgehaltes des Stromes

Kapitel 2 und 3 haben gezeigt, dass der THDi des Strangstromes im Dreieck-Dreieck Transformator 80,71% und im Dreieck-Stern Transformator 32,04% beträgt. Daher kann der THDi des primären Strangstromes im Dreieck-Dreieck-Stern Transformator gesenkt werden, indem mehr Leistung aus der sekundären Wicklung mit geringerem THDi entnommen wird. Die Überdimensionierung des Transformators kann also durch eine Anpassung der Leistungsverteilung minimiert werden. Das Minimum des THDi des primären Strangstromes ist $I_{\text{hgesMIN}} = 0,2747$. In diesem Fall wird 82% der Leistung aus der im Stern verschalteten Wicklung und 18% aus der im Dreieck verschalteten Wicklung entnommen. Man würde somit 5 Tiefsetzsteller an die sekundäre Sternwicklung und einen Tiefsetzsteller an die sekundäre Dreieckswicklung anschließen, um die Leistungsaufteilung von 18:82 mit identisch großen Tiefsetzstellern abdecken zu können. Alternativ kann man auch einen entsprechend größeren Tiefsetzsteller für die sekundäre Sternwicklung verwenden. Die Dauerleistung beträgt für dieses Leistungsverhältnis 106,5% der Lastleistung, bei einem THDi des Netzstromes von 24,11%. Die Berechnungen, sowie die Grafiken der entsprechenden Ströme für ein Leistungsverhältnis von 18:82 befinden sich im Anhang unter dem Unterkapitel A.1.

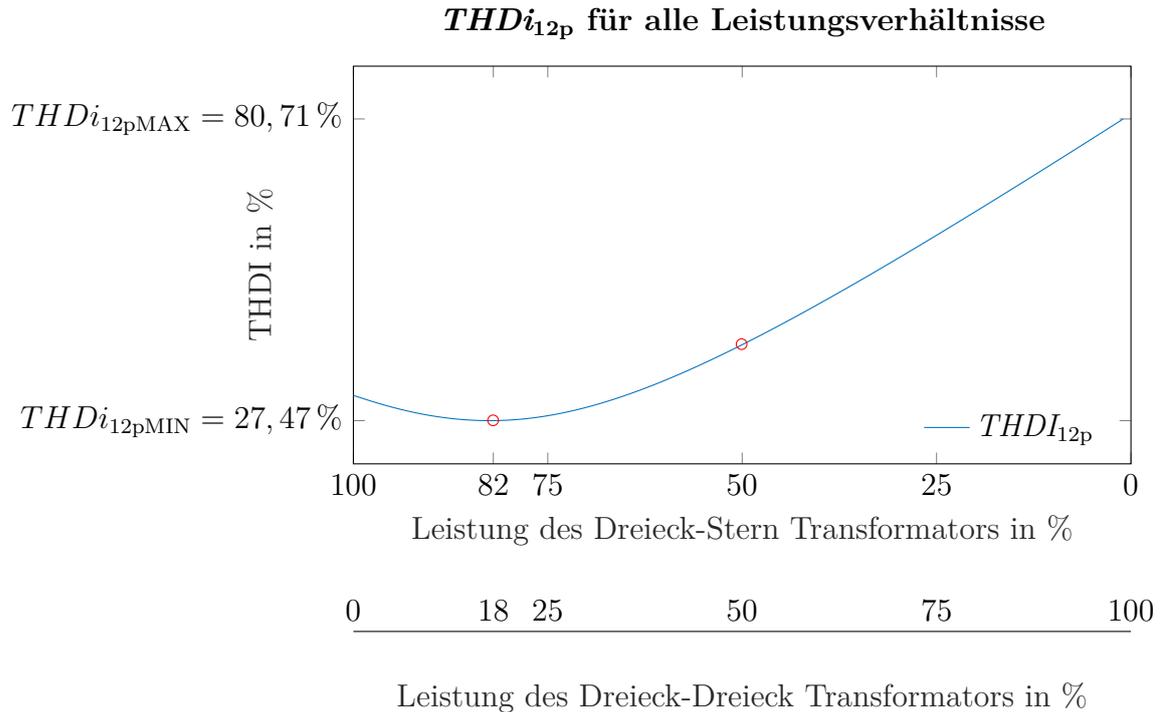


Abbildung 4.5.: Gesamt-Oberschwingungsgehalt des primären Strangstromes

Betrachtet man den THDi des Netzstromes, ergibt sich sein Minimum bei einer Leistungskonstellation von 50:50. Dies ist in Abbildung 4.6 anschaulich dargestellt. Die Maxima entsprechen den Leistungskonstellationen 100:0 und 0:100, also wenn nur aus einer Sekundärwicklung eines Schenkels die gesamte Leistung entnommen wird, was einem Dreieck-Dreieck Transformator, beziehungsweise einem Dreieck-Stern Transformator und einem 6-Puls Gleichrichter statt einem 12-Puls Gleichrichter entspricht. Abbildung 4.4 zeigt die Netzströme für die Leistungskonstellation 50:50 mit dem minimalen Oberschwingungsgehalt von 16,48% ($THDi_{1pMIN}$). Bei einem 12-Puls Gleichrichter mit symmetrischer Lastaufteilung sind die Außenleiterströme beider Transformatoren sekundär gleich groß ($I_{1sY} = I_{1s\Delta}$). Dementsprechend wird sekundär ein Strangstrom dessen Effektivwert um $\sqrt{2}$ größer ist aus der Sternseite entnommen. Bis $I_{12sY} = \sqrt{2} \cdot I_{12s\Delta}$ hat die Erhöhung des sekundären Strangstromes somit einen positiven Effekt auf den THDi des Netzstromes. Der Netzstrom des Dreieck-Dreieck- und des Dreieck-Stern Transformator ist bei symmetrischer Lastaufteilung gleich groß ($I_{1pY} = I_{1p\Delta}$).

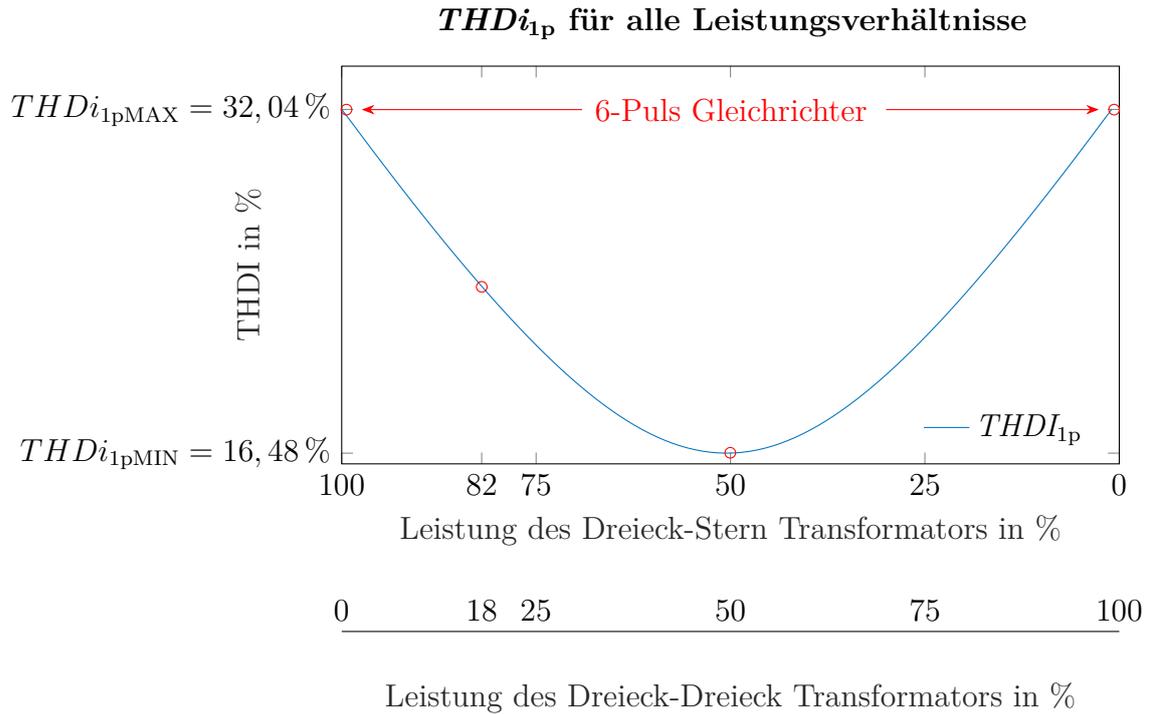


Abbildung 4.6.: Gesamt-Oberschwingungsgehalt des Netzstromes

4.3.2. Betrachtung des Amplitudenspektrums des Netzstromes

Normiertes Amplitudenspektrum des Netzstromes des 12-Puls Gleichrichters

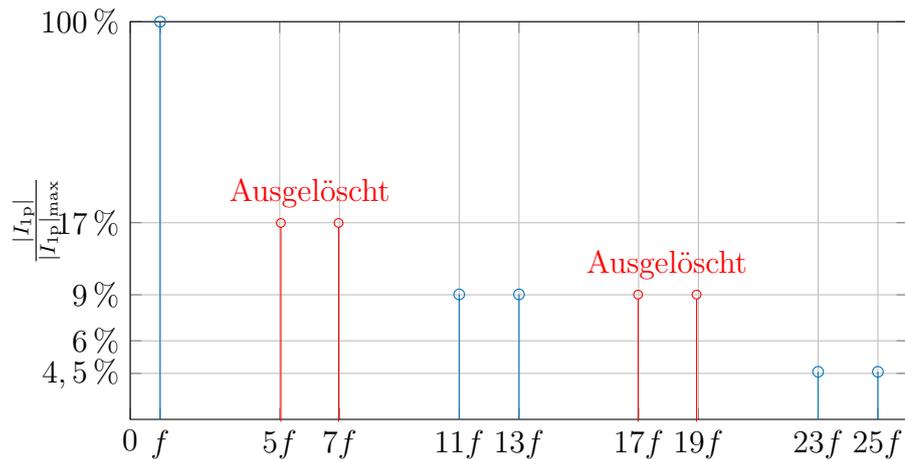


Abbildung 4.7.: Normiertes Amplitudenspektrum des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators

Der 12-Puls Gleichrichter führt zu einer deutlichen Reduktion der in das Netz eingespeisten harmonischen Ströme gegenüber dem 6-Puls Gleichrichter.

Die Superposition der Ströme führt bei einer Leistungsaufteilung von 50:50 zu einer vollständigen Auslöschung der 5ten und 7ten, sowie der 17ten und der 19ten Harmonischen im Amplitudenspektrum, wie in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Dies macht die Nutzung dieser Leistungsaufteilung, aus Sicht der Netzfrendlichkeit sehr attraktiv.

4.3.3. Berechnung der Durchlassverluste im Kupfer

Die Kupferverteilung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators ergibt sich wie folgt:

$$Cu_{ges} = N_p \cdot A_{p\Delta} + N_Y \cdot A_{sY} + N_\Delta \cdot A_{s\Delta} = (\ddot{u}_\Delta \cdot N_\Delta \cdot \frac{2}{\ddot{u}_\Delta} + \frac{N_\Delta}{\ddot{u}_{\Delta Y}} \cdot \ddot{u}_{\Delta Y} + N_\Delta) \cdot A_{s\Delta} = 4 \cdot N_\Delta \cdot A_{s\Delta} \quad (4.67)$$

Es befindet sich somit 50% des Kupfers auf der Primärseite und 50% des Kupfers auf der Sekundärseite, wobei sich das Kupfer der Sekundärseite zwischen den beiden Sekundärwicklungen aufteilt. Sodass an die Sekundärwicklung im Stern 25% und die Sekundärwicklung im Dreieck ebenfalls 25% des gesamten Kupfers abfallen.

Die addierten Durchlassverluste der beiden einzeln betrachteten Transformatoren ergeben zusammen:

$$P_{12vCu\Delta+Y} = P_{12vCuY} + P_{12vCu\Delta} = \left(\frac{2}{3} + \frac{2}{3}\right) \cdot R_{s\Delta} \cdot 2 \cdot I_{12s\Delta}^2 + 2 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 4,667 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (4.68)$$

Die primären Strangströme ergeben sich aus der Superposition der beiden bisherigen primären Ströme (siehe Formel 4.63). Aufgrund der Superposition der Ströme ergibt sich ein sinusförmigerer Strom. Dessen Effektivwert ist:

$$I_{12p} = \frac{12}{13} \cdot (I_{12pY} + I_{12p\Delta}) \quad (4.69)$$

Für die Durchlassverluste im Kupfer ergibt sich sekundär für einen Schenkel wie folgt:

$$P_{vs} = P_{vsY} + P_{vs\Delta} = \frac{2}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot (\sqrt{2})^2 \cdot I_{12s\Delta}^2 + R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 2,333 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (4.70)$$

Der Strang-Strom im Stern ist $\sqrt{2}$ größer, als der Strang-Strom im Dreieck, wie im Unterkapitel 4.3.1 berechnet.

Für die Primärseite betragen die Durchlassverluste eines Schenkels:

$$P_{vp} = R_{p\Delta} \cdot I_{12p}^2 = R_{p\Delta} \cdot \frac{12}{13} \cdot (2 \cdot I_{12pY}^2 + I_{12p\Delta}^2) = \frac{12}{13} \cdot \ddot{u}_{\Delta}^2 \cdot R_{s\Delta} \cdot (2 \cdot (\frac{I_{12sY}}{\ddot{u}_Y})^2 + (\frac{I_{12s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}})^2) \quad (4.71)$$

$$= \frac{12}{13} \cdot R_{s\Delta} \cdot (\frac{4}{\ddot{u}_{\Delta Y}^2} + 1) \cdot I_{12s\Delta}^2 = \frac{12}{13} \cdot R_{s\Delta} \cdot \frac{7}{3} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 2,154 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (4.72)$$

Die gesamten Durchlassverluste im Kupfer eines Schenkels des Transformators ergeben sich somit zu:

$$P_{12vCu} = P_{vp} + P_{vs} = \frac{28}{13} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 + \frac{7}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (4.73)$$

$$= 4,487 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 0,9614 \cdot P_{12vCu\Delta+Y} \quad (4.74)$$

Der Dreieck-Dreieck-Stern Transformator hat somit 3,86% niedrigere Durchlassverluste im Kupfer eines Schenkels, als wenn einen Dreieck-Dreieck Transformator und einen Dreieck-Stern Transformator bei jeweils halben Laststrom betrieben würden.

4.3.4. Optimierung der Kupferverteilung

Betrachtet man die Stromdichte in den Wicklungen fällt auf, dass diese unterschiedlich groß sind. Daher können die Durchlassverluste im Kupfer über eine Anpassung der Leiterquerschnitte für diese Schaltung noch weiter optimiert werden. Bisher ist die Stromdichte im Stern 18,35% geringer und die Stromdichte in den primären Windung ist 16,2% kleiner, als die in der sekundären Dreieckswindungen desselben Schenkels. Nach der Anpassung der Stromdichte besitzt der Transformator nun primär 47,995% des Kupfers, sekundär im Dreieck 28,633% und sekundär im Stern entsprechend 23,379% des Kupfers eines Schenkels.

Somit konnten durch Anpassung der Leiterquerschnitte eine weitere Verbesserung der Durchlassverluste im Kupfer von 12,19% erzielt werden. Die Verluste in den Wicklungen eines Schenkels nach dem Anpassen der Leiterquerschnitte, sind dementsprechend nun um 16,05% kleiner als bei der Verwendung eines Dreieck-Dreieck und eines Dreieck-Stern Transformators. Allerdings würde die primäre Wicklung eines Transformators in dieser Konfiguration bei der Belastung mit ohmschen Widerständen überhitzen. Sie ist also nur für die Verwendung mit einem 12 Puls Gleichrichter und Tiefsetzstellern geeignet. Die Berechnungen zu diesem Unterkapitel befinden sich im Anhang unter dem Kapitel A.2.

4.3.5. Berechnung der Scheinleistung

In Abbildung 4.8 sind die Netzspannung und der Netzstrom der ersten Phase dargestellt. Auch hier ist die Phasenverschiebung $\phi = 0^\circ$. Die Superposition der Ströme ist gut zu erkennen. Der Stromverlauf des 12-Puls Gleichrichters weist innerhalb einer Netzperiode 12 Stufen auf und besitzt damit doppelt so viele wie die Stromverläufe des 6-Puls Gleichrichters. Zwischen den Maxima hat der Stromverlauf zwei Stufen mehr, als der des 6-Puls Gleichrichters mit Dreieck-Stern Transformator und drei Stufen mehr, als der des 6-Puls Gleichrichters mit Dreieck-Dreieck Transformator. Im Phasenstrom verbleiben primär keine stromlosen Intervalle wie beim Dreieck-Dreieck Transformator. Der primäre Einfluss des Stromes aus der sekundären Sternwicklung zeigt sich durch die unterschiedlich hohen Stufen und den sehr steilen Nulldurchgang des Netzstromverlaufes.

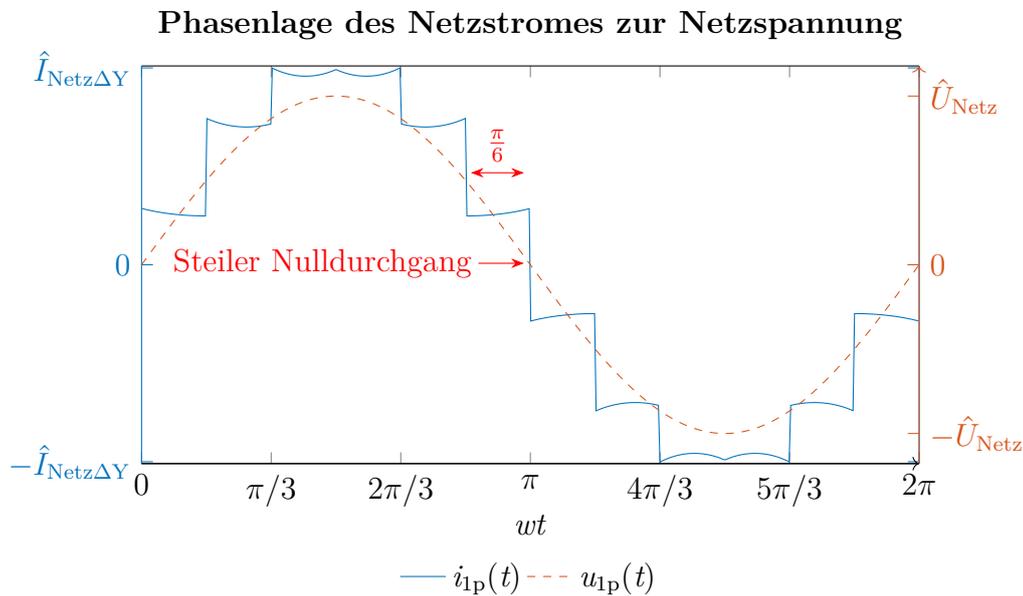


Abbildung 4.8.: Darstellung der Phasenlage von Netzstrom und Netzspannung

4.3.6. Berechnung der Nennleistung des Transformators

Die erforderliche Dauerleistung bei der Verwendung von zwei Transformatoren ergibt sich wie folgt:

$$\frac{P_{\text{Dauer}\Delta+Y}}{P_{\text{Last}}} = \frac{128,5\% + 105\%}{2} = 116,75\% \quad (4.75)$$

Der Dreieck-Dreieck-Stern Transformator hat primär einen THDi von 40,63% in den Strangströmen. Der normierte primäre Strangstrom der Harmonischen entspricht somit:

$$I_{\text{hges}} = 0,4063 \cdot I_f \quad (4.76)$$

Daraus ergibt sich eine Zusatzbelastung der Leiter durch die primären Strangströme um 7,9%:

$$I_{12\text{pges}} = \sqrt{I_f^2 + I_{\text{hges}}^2} = 1,079 \cdot I_f \quad (4.77)$$

Die erforderliche Dauerleistung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators ergibt sich somit zu:

$$\frac{P_{\text{Dauer}\Delta Y}}{P_{\text{Last}}} = \frac{\left(\frac{I_{12\text{pges}} + I_{12\text{ges}\Delta}}{2} + \frac{I_{12\text{pges}} + I_{12\text{ges}Y}}{2}\right) \cdot U_f}{2 \cdot P_{\text{Last}}} = \frac{\left(\frac{2,364}{2} + \frac{2,129}{2}\right) \cdot I_f \cdot U_f}{2 \cdot P_{\text{Last}}} \quad (4.78)$$

$$= \frac{1,182 + 1,065}{2} = 112,4\% < 116,75\% \quad (4.79)$$

Die Dauerleistung beträgt somit 112,4% der Lastleistung. Der Transformator muss bei einer Leistungsverteilung von 50:50, also um 12,4% überdimensioniert werden. Dies bedeutet eine deutliche Verbesserung zum Dreieck-Dreieck-Transformator, ist aber auch schlechter als beim Dreieck-Stern Transformator. Dies liegt am Einfluss der sekundär im Dreieck geschalteten Wicklung. Die Verwendung eines Transformators mit zwei Sekundärwicklungen hat somit einen positiven Effekt, auf die benötigte Nennleistung.

In der Tabelle 4.1 sind die THDi der einzelnen Ströme einmal gegenübergestellt. Betrachtet man den Strangstrom, ist sofort ersichtlich, dass bei einer Anwendung mit einem 6-Puls Gleichrichter ein Dreieck-Stern Transformator bevorzugt werden sollte. Der Dreieck-Stern Transformator erfordert eine wesentlich geringere Überdimensionierung bei dem selben Netz-THDi.

Um den Netz-THDi weiter zu senken, ist eine Erhöhung der Pulsanzahl nötig[12]. Wie man der Tabelle entnehmen kann, lässt sich durch die Verwendung eines 12-Puls Gleichrichters mit Dreieck-Dreieck-Stern Transformator nicht nur der THDi des Netzstromes senken, sondern auch der des primären Strangstromes. Aufgrund des deutlich höheren Oberschwingungsgehaltes des Stromes der sekundären Dreieckswicklung empfiehlt es sich einen höheren Strom aus der sekundären Sternwicklung zu entnehmen, wie in Unterkapitel 4.3.1 bereits erwähnt wurde. Das Minimum des THDi des primären Strangstromes befindet sich bei einer Leistungsverteilung von 18:82 zwischen der sekundären Dreiecks- und Sternwicklung.

Diese Leistungsverteilung führt zu einer Reduzierung des THDi des Netzstromes um 7,93% auf 24,11% im Vergleich zu einem 6-Puls Gleichrichter mit Dreieck-Stern Transformator. Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung eines netzfreundlichen 12-Puls Gleichrichters, daher liegt das Hauptaugenmerk auf der Reduzierung der in das Netz eingespeisten harmonischen Strömen. Das Minimum des Netz-THDi befindet sich bei einer Leistungsverteilung von 50:50 und beträgt 16,48%. Durch diese Anpassung kann der THDi des Netzstromes noch einmal um 7,63% gesenkt werden, im Vergleich zur Leistungsaufteilung von 18:82.

Tabelle 4.1.: Zusammenhang Gesamt-Oberschwingungsgehalt und Nennleistung

Schaltung	THDi _{Netz}	THDi _{12p}	THDi _{12sΔ}	THDi _{12sY}	Nennleistung P _{Dauer} /P _{Last}
ohne Gleichrichter					
Transformator mit ohmscher Last	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
6-Puls Gleichrichter					
Dreieck-Dreieck Transformator	32,04 %	80,71 %	80,71 %	-	128,5 %
Dreieck-Stern Transformator	32,04 %	32,04 %	-	32,04 %	105 %
12-Puls Gleichrichter					
Dreieck-Dreieck-Stern Transformator (18:82)	24,11 %	27,47 %	80,71 %	32,04 %	106,5 %
Dreieck-Dreieck + Stern Transformator (50:50)	16,48 %	80,71 %, 32,04 %	80,71 %	32,04 %	116,75 %
Dreieck-Dreieck-Stern Transformator (50:50)	16,48 %	40,63 %	80,71 %	32,04 %	112,4 %

Wobei die beim 12-Puls Gleichrichter in den Klammern stehenden Zahlen die sekundäre Leistungsaufteilung angeben.

Der THDi des Netzstromes soll jedoch weniger als 5 % betragen, um die Anforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit zu erfüllen[6]. Denn für elektronische Leistungs-Stromrichter gilt bei der P2G-Technologie die folgende Norm IEC 61000-6-2[18] bezüglich der harmonischen Gesamtverzerrung am Anschlusspunkt. Dies wurde hier nicht erreicht. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss der Oberschwingungsgehalt des Netzstromes zusätzlich durch aktive oder passive Filter verbessert werden.

Der größere Anteil des Stromes aus der sekundären Dreieckswicklung sorgt bei einem Leistungsverhältnis von 50:50 für eine Erhöhung des primären Oberschwingungsgehaltes des primären Strangstromes auf 40,63 %. Die netzfreundlichste Leistungsverteilung ist dementsprechend nicht die kostengünstigste, da sie zu einer Erhöhung der erforderlichen Nennleistung von 5,9 % im Vergleich zum Leistungsverhältnis von 18:82 führt. **Der Transformator muss dementsprechend für den Betrieb mit Dioden-Gleichrichtern immer überdimensioniert werden!**

5. Versuchsaufbau

5.1. Aufbau der Schaltung im Labor

5.1.1. 12-Puls Gleichrichter

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde die Schaltung aus Kapitel 4 im Labor aufgebaut. Die Schaltung besteht aus 4 Komponenten. Begonnen wurde mit dem Aufbau der beiden 6-Puls Gleichrichter. Ein 6-Puls Gleichrichter besteht aus 6 Dioden[19]. Auf der Leiterplatte (Printed Circuit Board) (PCB) befindet sich zwei 6-Puls-Gleichrichter (links und rechts). Die beiden positiven Ausgänge befinden sich auf der vom Betrachter abgewandten Seite der PCB und die beiden negativen entsprechend auf der dem Betrachter zugewandten Seite. Am Ausgang jedes 6-Puls Gleichrichters befindet sich ein $68\ \mu\text{F}$ Kondensator zur Glättung der pulsierenden Ausgangsspannung. Durch die Leuchtdioden (LEDs)[20] ist leicht erkennbar, ob der jeweilige Gleichrichter in Betrieb ist.

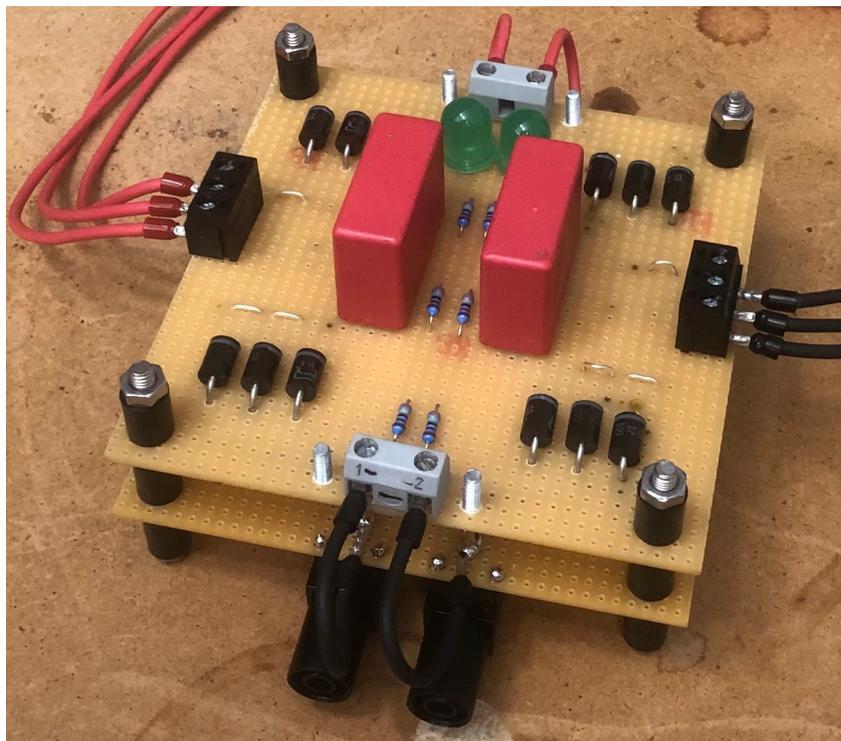


Abbildung 5.1.: Laboraufbau der beiden 6-Puls-Gleichrichter

5.1.2. Dreieck-Dreieck-Stern Transformator

Im nächsten Schritt wurde mit dem Aufbau des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators begonnen. Der bestellte Drehstromtransformator hat ein Übersetzungsverhältnis von [21]:

$$\ddot{u} = \frac{400 \text{ V}}{12 \text{ V}} = \frac{N_p}{N_Y} = \frac{1300}{39} \quad (5.80)$$

Außerdem besitzt der Transformator eine Primär- und Sekundärwindung pro Schenkel, welche im Dreieck und im Stern verschaltet waren. Dementsprechend wurde der Transformator von mir sekundär neu gewickelt, sodass er pro Schenkel zwei Sekundärwindungen hat, welche im Dreieck und im Stern verschaltet sind. Die primäre Windungsanzahl konnte ich über das Übersetzungsverhältnis berechnen, nachdem ich die Anzahl der sekundären Windungen beim Abwickeln gezählt hatte. Beim Wickeln der Sekundärwicklung habe ich die Windungszahlen erhöht, um eine höhere Ausgangsspannung zu generieren. Dabei habe ich versucht, dem Verhältnis von $\sqrt{3}$ zwischen den Sekundärwindungen möglichst nahe zu kommen. Die neuen Übersetzungsverhältnisse sind wie folgt:

$$\ddot{u}_\Delta = \frac{1300}{85} = \frac{N_p}{N_{\Delta\text{NEU}}} \quad (5.81)$$

$$\ddot{u}_Y = \frac{1300}{49} = \frac{N_p}{N_{Y\text{NEU}}} \quad (5.82)$$

Die gemessenen die Hauptinduktivitäten des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators befinden sich in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1.: Gemessene Hauptinduktivitäten des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators

Schenkel	primär	sekundär Dreieck	sekundär Stern
Links	5,48 H	2,03 mH	6,09 mH
Mitte	7,6 H	3,59 mH	10,75 mH
Rechts	5,49 H	2,82 mH	8,35 mH

Die primäre Hauptinduktivität eines Schenkels wird gemessen, indem die beiden anderen Primärwicklungen und alle Sekundärwicklungen offen gelassen werden. Die sekundäre Hauptinduktivität eines Schenkels wird dementsprechend gemessen, indem alle Primärwicklungen, sowie die beiden anderen Sekundärwicklungen offen gelassen werden.

Das Verhältnis der sekundären Induktivitäten sollte in der Theorie wie folgt zueinander sein:

$$L_{m2\Delta} = \dot{u}_{\Delta Y}^2 \cdot L_{m2Y} \quad (5.83)$$

Aufgrund der unterschiedlichen magnetischen Widerstände in den Schenkeln, weichen die Hauptinduktivitäten voneinander ab und sind nicht exakt gleich. Dies gilt insbesondere für die Hauptinduktivitäten des mittleren Schenkels, die aus konstruktiven Gründen von denen der äußeren Schenkel abweichen[22].



Abbildung 5.2.: Induktivitätsmessgerät mit Dreieck-Dreieck-Stern Transformator, hier bei der Messung der sekundären Dreieckswicklung, des rechten Schenkels

5.1.3. Elektrolyseur / Last

Da im Labor kein Elektrolyseur als Last zur Verfügung steht, habe ich eine Last von 200 W aufgebaut, welche den Elektrolyseur in meinem Aufbau simuliert. Die Last besteht aus 376 Bauteilen, welche auf vier PCB verteilt sind.

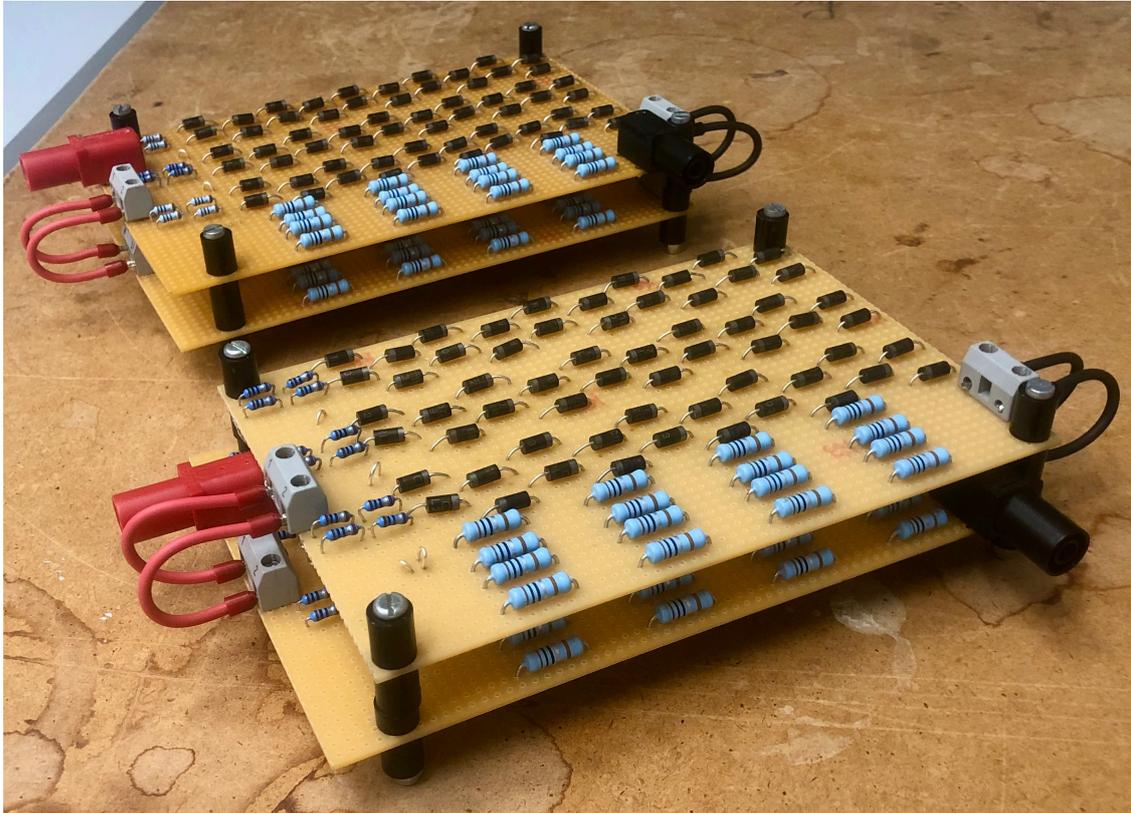


Abbildung 5.3.: Last zur Simulation eines Elektrolyseurs. In der Grafik sind jeweils zwei Lagen parallel zueinander verschaltet.

Auf jeder PCB befinden sich somit knapp 100 Bauteile, welche eine Verlustleistung von 50 W generieren. Jede PCB besteht am Eingang aus einer Parallelschaltung von drei Strängen. Zu Beginn jedes Stranges gibt es eine zusätzliche Parallelschaltung von vier $1\ \Omega$ Widerständen. An den Widerständen kann die Spannung gemessen und so der Strom bestimmt werden, welcher durch jeden Strang fließt. Durch diese Widerstände ist es möglich im Betrieb zu prüfen, ob sich der Strom symmetrisch auf alle Stränge verteilt. Im Anschluss folgt in jedem Strang eine Reihenschaltung von 20 Dioden. Durch die Reihenschaltung der Dioden summieren sich ihre Schwellenspannungen von $0,7\ \text{V}$ zu $14\ \text{V}$ auf. Es fließt dementsprechend erst ein Strom durch den Strang, wenn eine Spannung von mindestens $14\ \text{V}$ anliegt. Durch die steilen Diodenkennlinien steigt der Strom bei einer weiteren Erhöhung der Spannung sehr schnell im Vergleich zur Spannung an. Dies entspricht dem Verhalten eines echten Elektrolyseurs, wo eine kleine Spannungsänderung zu einer großen Stromänderung führt.

Nach der Reihenschaltung der Dioden vereinigen sich die Stränge wieder zu einem, um sich danach auf vier parallele Stränge aufzuteilen. Jeder der vier Stränge besteht aus einer Reihenschaltung von vier $1\ \Omega$ Widerständen. Die Berechnungen dazu befinden sich im Anhang im Unterkapitel A.3.

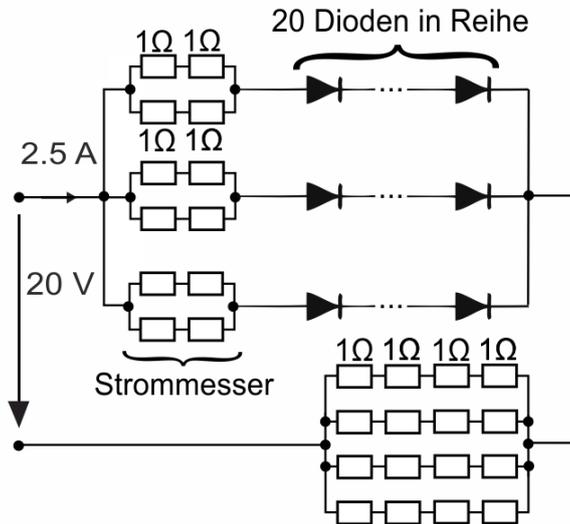


Abbildung 5.4.: Schaltplan von einer Lage der Last mit einer Verlustleistung von 50 W

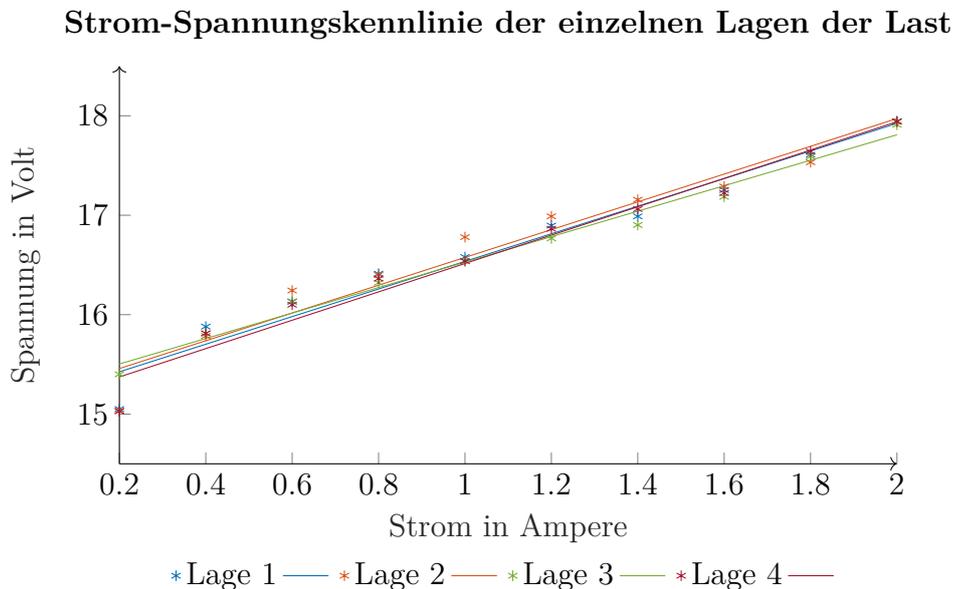


Abbildung 5.5.: Strom-Spannungskennlinien der einzelnen Lagen

Um die einzelnen Strom-Spannungskennlinien der vier Lagen zu überprüfen, habe ich im Labor an einer Gleichstromquelle für jede Lage die selben Strom- und Spannungsmesspunkte aufgenommen. Die jeweiligen Messpunkte sind als Sternchen mit ihren entsprechenden Ausgleichsgeraden in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Ausgleichsgeraden wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate berechnet. Der erste Messpunkt liegt bei 0,2 A, da sehr kleine Ströme sehr schwer beziehungsweise nur recht ungenau an der mir zur Verfügung stehenden Gleichstromquelle einzustellen waren. Außerdem war der maximal Strom der Quelle auf 2 A beschränkt, weshalb der letzte Messpunkt der Kennlinien bei 2 A liegt.

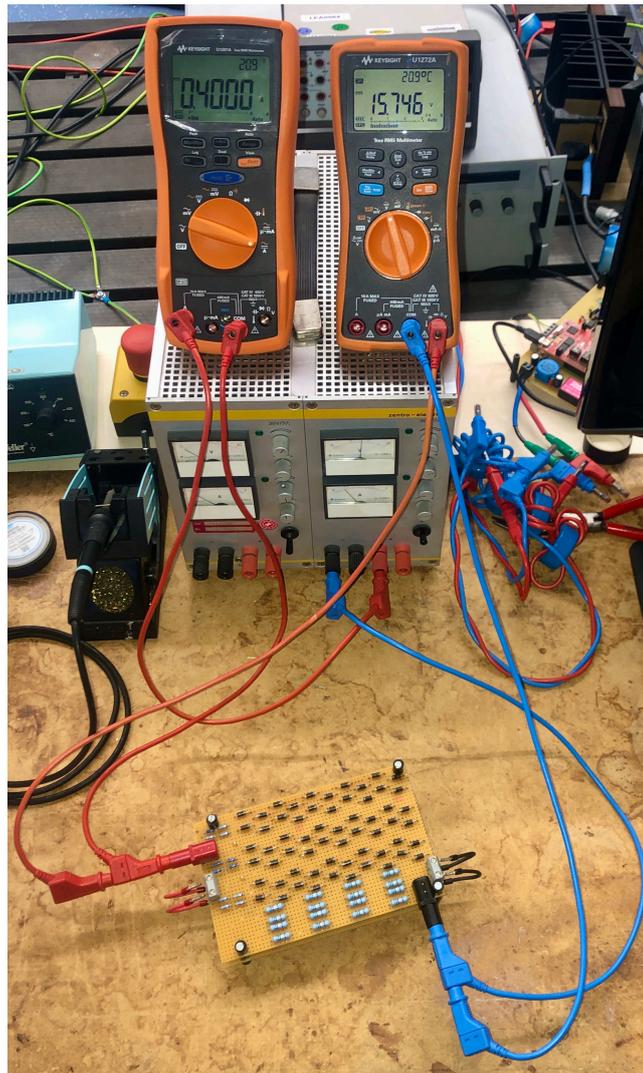


Abbildung 5.6.: Messaufbau zur Ermittlung der Strom-Spannungskennlinien der einzelnen Lagen der Last

5.1.4. Glättungsinduktivität

Zur Glättung der Ausgangsströme wurde eine Induktivität mit vier Strängen aufgebaut. In jedem Strang befinden sich zwei Spulen mit einer Induktivität von $150 \mu\text{H}$ [23] in Reihe. Die Besonderheit ist, dass zwei Stränge einen gemeinsamen Ausgang besitzen. Man kann zwei Stränge dementsprechend auch in Reihe schalten, wenn der zweiten Eingang als Ausgang benutzt wird.

In Abbildung 4.1 sind die Glättungsinduktivitäten als Spule des Tiefsetzstellers dargestellt. Der Aufbau im Labor erfolgt ohne die Tiefsetzsteller. Die Gleichrichter wurden direkt mit den Glättungsinduktivitäten verbunden und diese wurden wiederum mit der Last verbunden.

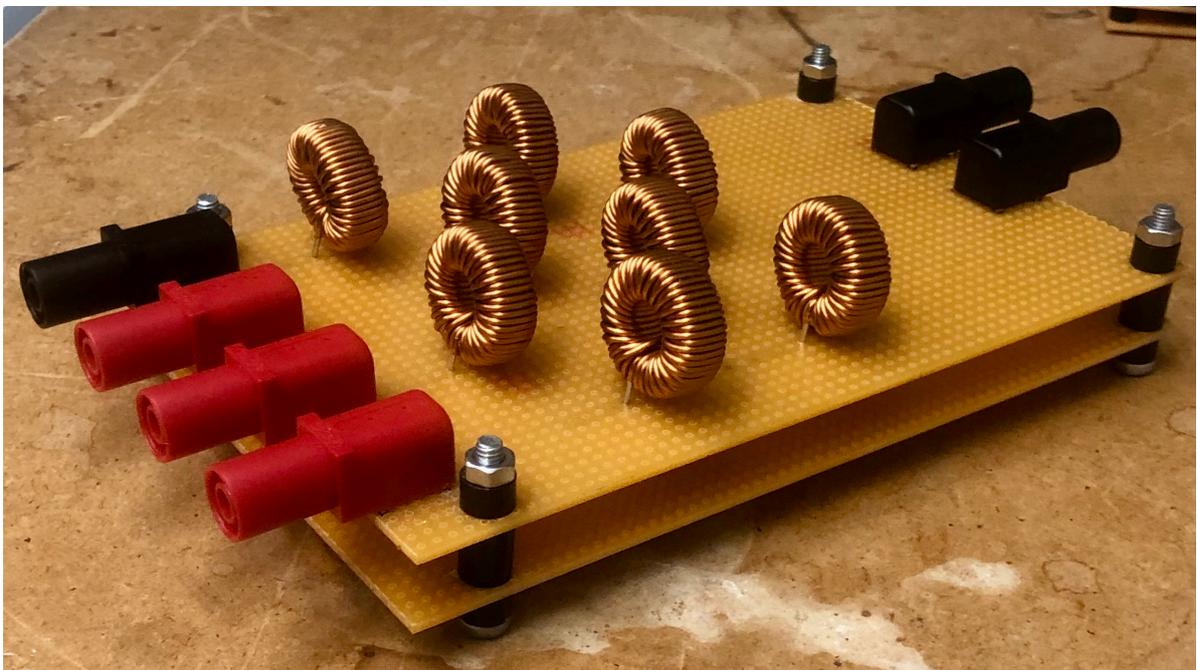


Abbildung 5.7.: Spulen zur Glättung des Ausgangsstromes des Gleichrichters

5.2. Messungen

Die Schaltung wurde durch einen Labortransformator gespeist, welcher eine variable Ausgangsspannung hat, die manuell eingestellt werden kann. Um möglichst glatte und sinusförmige Netzspannungen zu erhalten, wurden in jeder Phase große Glättungskondensatoren zwischengeschaltet, an welche der Dreieck-Dreieck-Stern Transformator angeschlossen wurde. Die Sekundärwicklungen sind jeweils mit den 6-Puls Gleichrichtern verbunden. An den Ausgang des 6-Puls Gleichrichters wird die Glättungsinduktivität angeschlossen, an welche die Last angeschlossen wird. Ziel ist es, die simulierten Strom- und Spannungsverläufe am Oszilloskop zu überprüfen und darzustellen. Auf dem Vierstrahl Oszilloskop werden im Dauerbetrieb die Verläufe der vier Kanäle zeitgleich zueinander abgebildet. Aufgrund des direkten Betriebs der Last am Ausgangs des Gleichrichters ohne Tiefsetzsteller, stellt sich ein Laststrom (i_{DC}) ein, der denselben zeitlichen Verlauf in Form und Frequenz hat wie die Lastspannung (u_{DC}). Zudem weist der Laststrom aufgrund des passiven Verbrauchers keine Phasenverschiebung auf. Dies gilt auch für die anderen aufgenommenen Ströme, da sie sich von dem Laststrom ableiten. Es wurden immer zwei Lagen der Last parallel geschaltet und mit einem Gleichrichter verbunden. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass an der Last ungefähr ein Laststrom von 5 A fließt, welcher sich auf die beiden Lagen aufteilt. Um die Strom- und Spannungsverläufe der ersten beiden Kapitel 2 und 3 ebenfalls zu überprüfen, wurde jeweils eine Sekundärseite des Transformators offen gelassen.

Die Messpunkte, bei denen die jeweiligen Schaltungen gemessen wurden, befinden sich in der nachgestellten Tabelle.

Tabelle 5.2.: Messpunkte, bei denen die folgenden Grafiken aufgenommen wurden

Schaltung	Netzspannungen (Leiter-Erde)	Laststrom
6-Puls Gleichrichter		
Dreieck-Dreieck Transformator	253,40 V, 253,05 V, 252,3 V	4,734 A
Dreieck-Stern Transformator	253,85 V, 253,44 V, 252,73 V	4,775 A
12-Puls Gleichrichter		
Dreieck-Dreieck-Stern Transformator (50:50)	247,82 V, 248,22 V, 246,69 V	4,807 A, 5,133 A

Bei allen mit dem Oszilloskop aufgenommenen Kennlinien gilt folgende farbliche Zuordnung:

- **Gelb** = Netzstrom einer Phase
- **Grün** = Ausgangsspannung des Gleichrichters (Lastspannung)
- **Rot** = Ausgangsstrom des Gleichrichters (Laststrom)

Die blau dargestellten Stromverläufe bilden bei den einzelnen Messungen verschiedene Strangströme des Transformators ab. Bei den Messungen des Dreieck-Dreieck und des Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter, wurde jeweils eine Phase des sekundären Strangstromes aufgenommen. Bei der Messung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter wurde der primäre Strangstrom einer Phase aufgenommen.

5.2.1. Dreieck-Stern Transformator

Es ist sehr gut zu erkennen, dass der Laststrom und die Lastspannung denselben Verlauf aufweisen. Beide haben 6 Pulse innerhalb einer Periode, welche durch den 6-Puls Gleichrichter erzeugt werden. Allerdings ist die Ausgangsspannung minimal verzerrt. Dies liegt wahrscheinlich an den leicht unterschiedlichen Spannungen in den einzelnen Wicklungen, aufgrund der sich unterscheidenden Hauptinduktivitäten. Auch im Laststrom zeigt sich, dass die drei Schenkel unterschiedliche Hauptinduktivitäten haben, da es drei unterschiedlich hohe Pulse gibt, welche sich nach einer halben Periode wiederholen.

Der aufgenommene sekundäre Strangstrom einer Phase entspricht exakt dem simulierten, wenn man von den minimalen Abweichungen der Maxima absieht. Die $\pi/3$ (3,33 ms) breiten stromlosen Intervalle, welche entstehen, wenn die Dioden der anderen beiden Phasen leiten, sind gut zu erkennen.

Aufgrund der begrenzten Anzahl von Eingängen des Oszilloskops und da der primäre Strangstrom denselben zeitlichen Verlauf, nur um das Übersetzungsverhältnis kleiner, wie der sekundäre Strangstrom hat, wurde dieser nicht extra aufgenommen.

Die Abweichungen des primären Strangstromes verstärken sich in den Knoten, aufgrund ihrer Subtraktion, sodass im Netzstrom ein wesentlich deutlicherer Unterschied in dem Verlauf der Stufenform des Stromes auftritt. Trotzdem ist die simulierte Form des Netzstromes noch gut zu erkennen. So weist er zum Beispiel dieselbe Stufenanzahl und die charakteristischen steilen Nulldurchgänge auf.

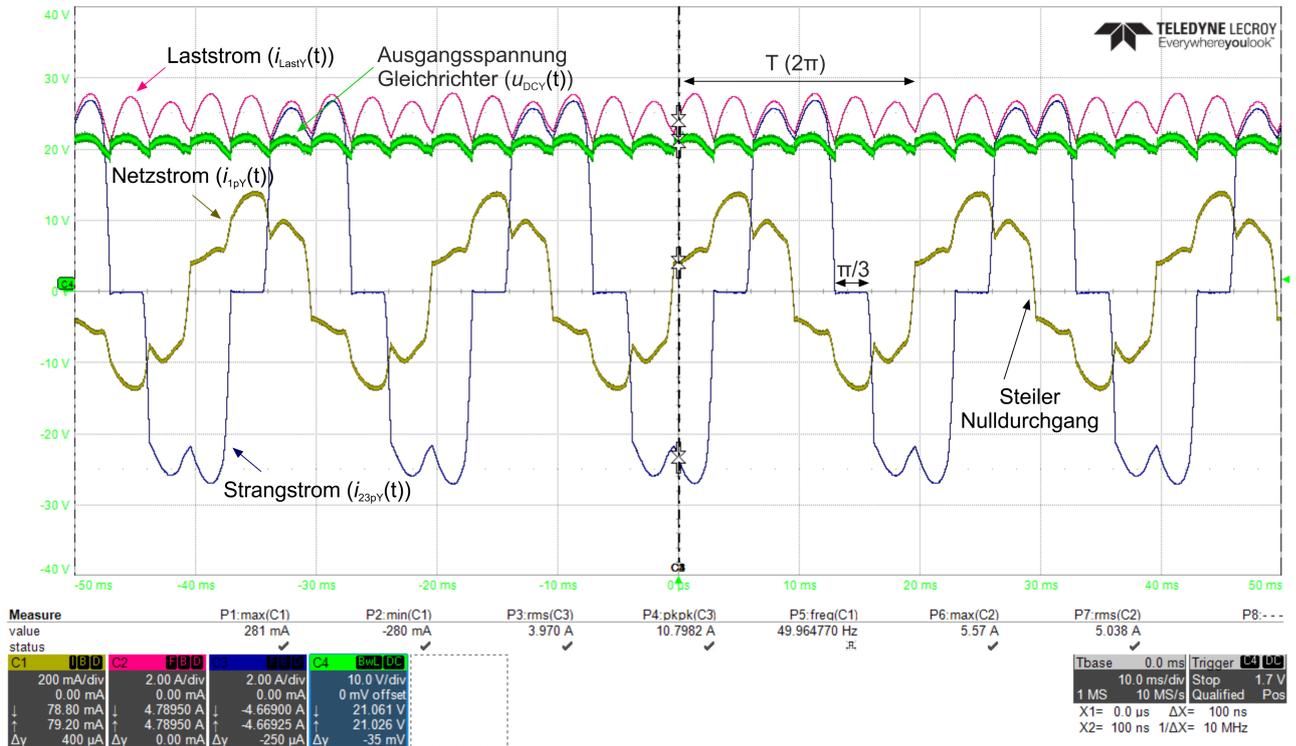


Abbildung 5.8.: Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

5.2.2. Dreieck-Dreieck Transformator

Es ist in Abbildung 5.9 sehr gut zu erkennen, dass der Laststrom und die Lastspannung denselben Verlauf aufweisen. Der Wechselstrom wird über einen 6-Puls Gleichrichter wie beim Dreieck-Stern Transformator gleichgerichtet, weshalb sowohl der Laststrom, als auch die Lastspannung 6 Pulse innerhalb einer Periode aufweisen. Allerdings tritt hier das Problem der unterschiedlichen Höhen der Maxima des Laststromes nicht auf. Die Verzerrung der Lastspannung jedoch schon.

Der abgebildete sekundäre Strangstrom weicht stark von dem simulierten ab. So sollte jede Windung den Strangstrom nur für $2\pi/3$ der Periodendauer führen, wobei der Strangstrom jeweils $\pi/3$ positiv und $\pi/3$ negativ sein sollte. Es hätten dementsprechend zwei $2\pi/3$ große stromlose Intervalle entstehen müssen. Stattdessen weist der sekundäre Strangstromverlauf jeweils zwei Stufen zwischen den Maxima und steile Nulldurchgänge auf. Er ähnelt damit sehr dem Verlauf des Netzstromes des Dreieck-Stern Transformators. Ich vermute, dass dies an den unterschiedlichen Streuinduktivitäten liegt.

Neben dem unerwarteten Verlauf des sekundären Strangstromes, fällt auf, dass seine Maxima im Verhältnis zu den Maxima des sekundären Strangstrom im Stern um einiges kleiner sind, bei ähnlichen hohen Netzspannungen und einem ähnliche hohen Laststrom. Dies kann an der sekundären Verschaltung im Dreieck liegen, wo sich die Strangströme über die Knotenregel aus den Außenleiterströmen bilden.

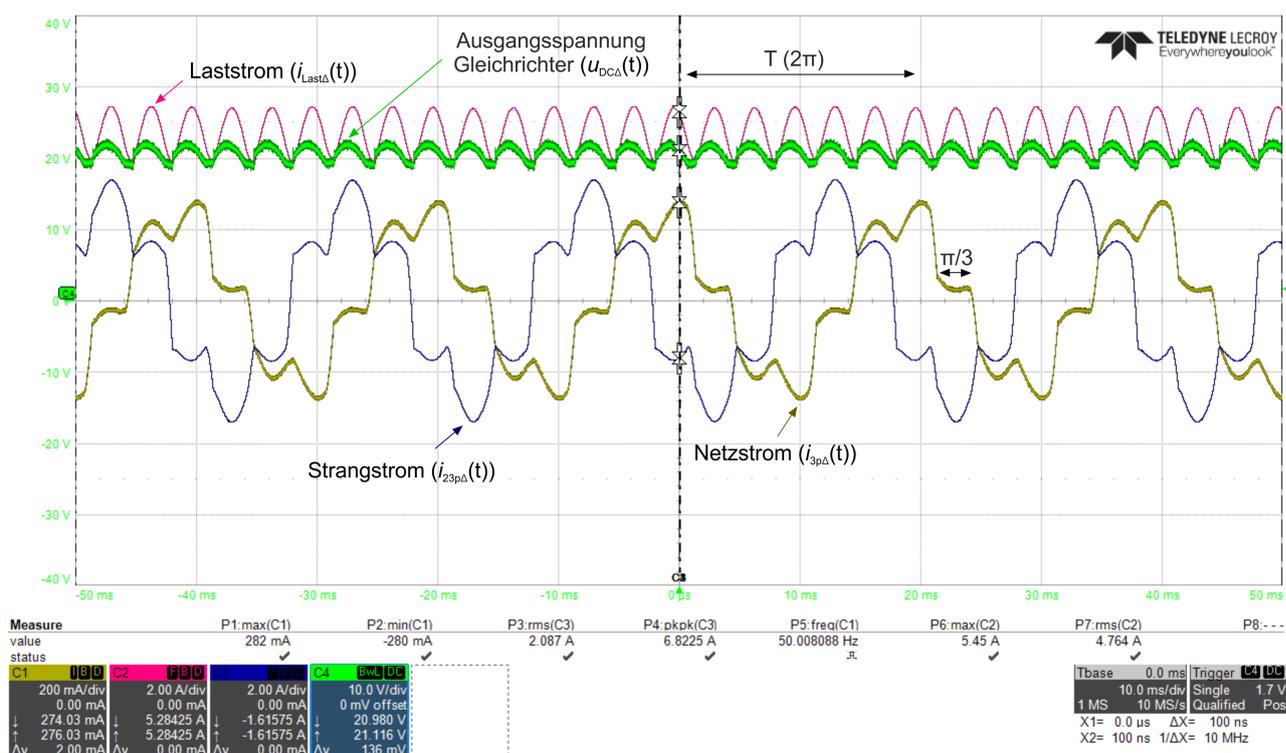


Abbildung 5.9.: Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Dreieck Transformators mit 6-Puls Gleichrichter

Der Betrag der Höhe der Stufen zwischen den Maxima ist nicht exakt gleich, weshalb sie sich bei der Subtraktion der primären Strangströme nicht komplett gegenseitig auslöschen. Dies zeigt sich im Verlauf des Netzstromes dadurch, dass die Stufe zwischen den Maxima nicht bei 0 A liegt sondern einmal etwas darüber und einmal etwas darunter. Die $\pi/3$ breiten Intervalle sind trotzdem gut zu erkennen und signifikant für den Netzstrom des Dreieck-Dreieck Transformators. Zusammengefasst entspricht der Verlauf des aufgezeichneten Netzstromes somit dem Verlauf des simulierten Netzstromes.

5.2.3. Dreieck-Dreieck-Stern Transformator

Bei der Messung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators wurden beide Sekundärwindungen eines Schenkels mit jeweils einem Gleichrichter verbunden. Die Ausgangsspannung jedes 6-Puls Gleichrichters weist nach wie vor 6 Pulse in einer Periode auf. Durch die Stromzange wurden diesmal beide Leitungen, welche den Gleichrichter mit der jeweiligen Last verbinden, geführt. Es wird am Oszilloskop somit die Summe der geglätteten Lastströme dargestellt.

Der abgebildete Laststrom weist dementsprechend 12 Pulse in einer Periode auf. Wobei der Laststrom der sekundären Sternwindung etwas höher ist, als der in der sekundären Dreieckswindung (siehe Tabelle 5.2). Dies ist auf die minimal unterschiedlichen Verluste der verschiedenen Lagen der Last zurückzuführen, welche sich unterschiedlich schnell erhitzt und dementsprechend unterschiedlich viel Leistung in Wärme umgewandelt haben. Die beiden parallelen Lasten des 12-Puls Gleichrichters bestehen jeweils aus zwei parallelen Lagen und haben ein gemeinsames negatives Potential. Wie in Abbildung A.4 darstellt, stellt sich bei einer parallelen Schaltung der vier Lagen und einer an der Last anliegenden Spannung von ca. 20 V ein Laststrom von ca. 10 A ein. Die simulierte Strom-Spannungskennlinie entspricht somit der tatsächlichen Strom-Spannungskennlinien, auch in den Randbereichen, welche mit der Gleichstromquelle zuvor nicht überprüft werden konnten.

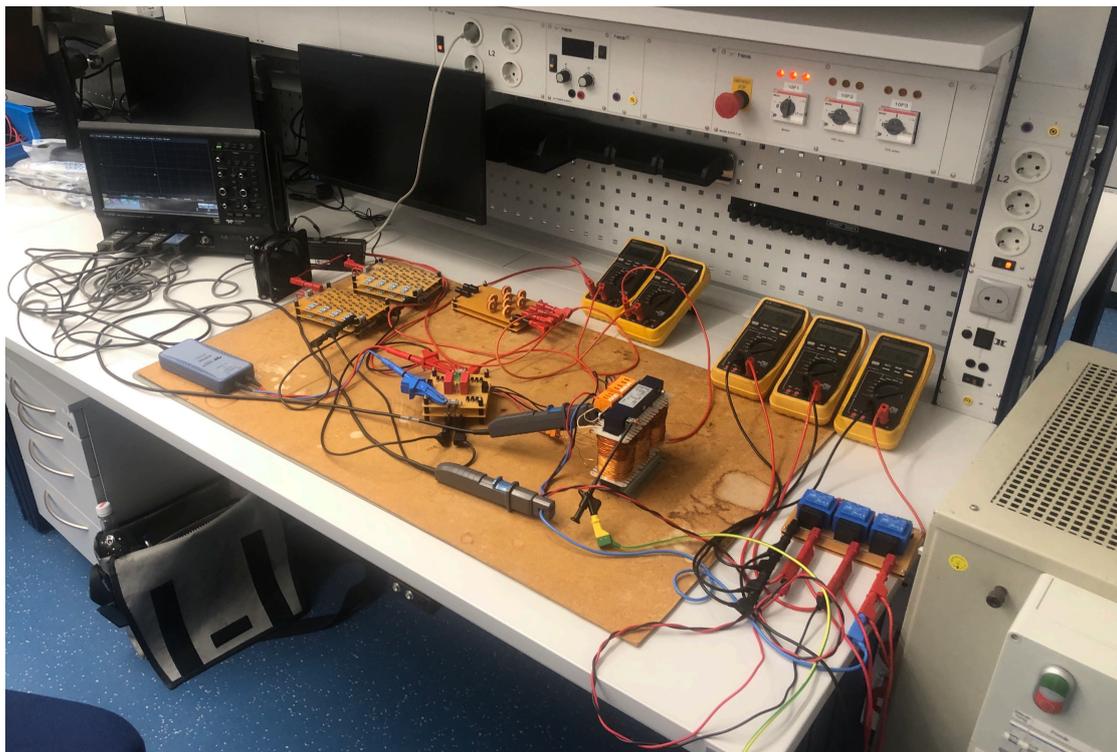


Abbildung 5.10.: Messaufbau des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter, Glättungsinduktivität und Last

Die beiden sekundären Strangströme wurden nicht abgebildet, da sie aus den vorherigen Messungen bereits bekannt sind. Zudem ist der primäre Strangstrom bei diesem Messaufbau von deutlich größerer Bedeutung. Am Verlauf des primären Strangstromes ist der Einfluss der sekundären Dreieckwindung gut zu erkennen, da die erste und letzte Stufe zwischen den Nulldurchgängen deutlich höher als simuliert sind. Ich vermute, dass dies auf die beiden Stufen des sekundären Strangstromes im Dreieck zurückzuführen ist, welche sich zwischen den Maxima befinden. Durch die Superposition der primären Strangströme werden die Abweichungen in der Höhe der Stufen verstärkt.

Der Verlauf des aufgezeichneten Netzstromes entspricht dem Verlauf des simulierten Netzstromes. Der aufgezeichnete Netzstrom weist die selben steilen Nulldurchgänge wie der simulierte Netzstrom auf und sein Verlauf ist entsprechend sinusförmiger als der primäre Strangstrom. Vor allem gegenüber den Netzströmen der 6-Puls Gleichrichter ist der Verlauf des Netzstromes des 12-Puls Gleichrichters deutlich sinusförmiger. Trotzdem sind die Stufen noch gut erkennbar.

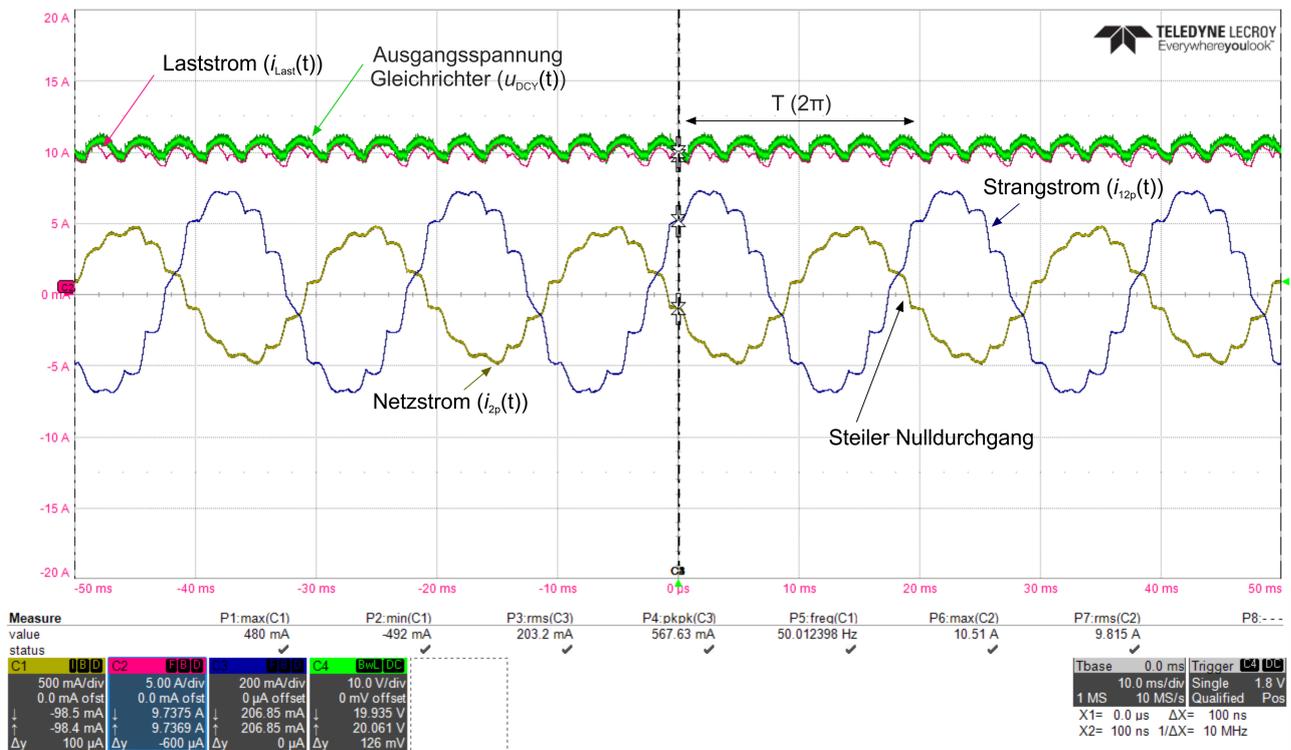


Abbildung 5.11.: Strom und Spannungsverläufe des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter

Zu beachten ist, dass die Skalierung des primären Strangstromes 200 mA/div beträgt und die des Netzstromes 500 mA/div. Die Skalierungen wurden so gewählt, da der Netzstrom im Dreieck um einiges größer als der primäre Strangstrom ist, wie in dem Unterkapitel 4.2.2 bereits berechnet und simuliert wurde.

6. Diskussion

6.1. Zusammenfassende Bewertung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Stromversorgung eines Elektrolyseurs. Die behandelten Schaltungen bestehen aus einem Transformator und einem Gleichrichter. Der Transformator stellt eine galvanische Trennung der Primär- und Sekundärseite sicher. Die Primärwicklungen sind bei allen betrachteten Transformatoren im Dreieck verschaltet. Die verschiedenen Möglichkeiten der Verschaltungen der Sekundärwicklungen des Transformator wurden in dieser Arbeit gegenübergestellt und bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Netz durch eingespeiste harmonische Ströme, erforderlichen Nennleistungen und ihre Durchlassverluste untersucht.

Es konnte bewiesen werden, dass ein Dreieck-Stern Transformator dem Dreieck-Dreieck Transformator bei der Verwendung mit einem 6-Puls Gleichrichter definitiv vorzuziehen ist. Beide Transformatoren weisen einen Netz-THDi von 32,04 %, bei unterschiedlichen Stromverläufen, auf. Aus dem Dreieck-Stern Transformator kann aber eine 22,47 % größere Leistung bei dem gleichen Material entnommen werden. Zudem ist die erforderliche Überdimensionierung der Nennleistung 23,5 % geringer als beim Dreieck-Dreieck Transformator.

Eine Erhöhung der Pulszahl des Gleichrichters von 6 auf 12 führt zu einer Verbesserung des Netz-THDi. Daher sollte ein 12-Puls Gleichrichter einem 6-Puls Gleichrichter immer vorgezogen werden. Wobei die Aufteilung der entnommenen Leistung aus der jeweiligen Sekundärwicklung einen großen Einfluss auf den Oberschwingungsgehalt des Netzstromes des 12-Puls Gleichrichters hat. Der minimale Oberschwingungsgehalt wird erreicht, wenn aus beiden Tiefsetzstellern, welche den Gleichrichtern nachgestellt sind, dieselbe konstante Leistung entnommen wird. Das Minimum des Netz-THDis liegt bei 16,48 %. Bei der Verwendung eines Transformators mit zwei Sekundärwicklungen statt der Verwendung von zwei Transformatoren kann die erforderliche Überdimensionierung um 4,35 % gesenkt werden und die Durchlassverluste um 3,86 % reduziert werden. Optimiert man die Kupferverteilung des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators können die Durchlassverluste um weitere 12,19 % reduziert werden. Dennoch müssen Transformatoren für den Betrieb mit Dioden Gleichrichtern immer überdimensioniert werden. Die simulierten Strom- und Spannungsverläufe wurden mittels eines Messaufbaus überprüft.

6.2. Ausblick

Ein weiteres Ziel wird es sein zwei entsprechenden Tiefsetzsteller für die Schaltung aufzubauen und die durchgeführten Messungen zu wiederholen. Des weiteren kann die Auswirkung der Veränderung des Verlaufes der entnommenen Leistung auf den THDi des Netzstromes weiter untersucht werden. Dies geht jedoch über die Ziele dieser Bachelorarbeit hinaus.

A. Anhang

A.1. Leistungsverhältnis von 18:82 Prozent

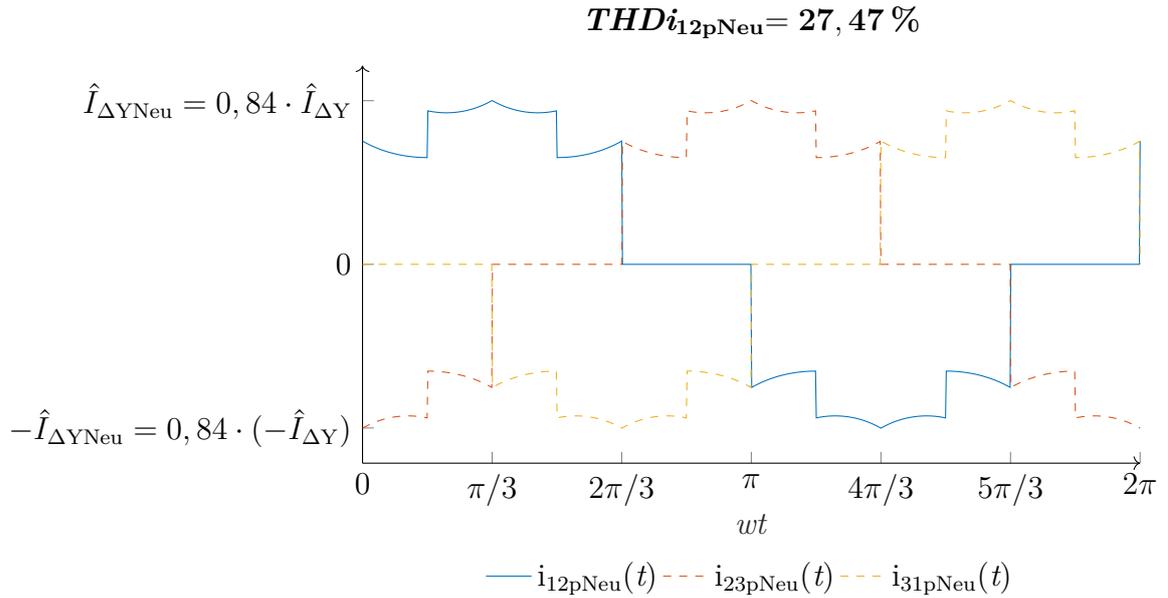


Abbildung A.1.: Darstellung der primären Strangströme des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter

Die Zusatzbelastung der Leiter durch den primären Strangstrom beträgt 3,7%.

$$I_{12pGesNEU} = \sqrt{I_f^2 + I_{hGesNEU}^2} = 1,037 \cdot I_f \quad (A.84)$$

Die Dauerleistung ergibt sich somit zu:

$$\frac{P_{Dauer\Delta YNEU}}{P_{Last}} = \left(\frac{I_{12pGesNEU} + I_{12Ges\Delta}}{2 \cdot P_{Last}} \cdot 0,18 + \frac{I_{12pGesNEU} + I_{12GesY}}{2} \cdot 0,82 \right) \cdot U_f \quad (A.85)$$

$$= \frac{(0,209 + 0,856) \cdot I_f \cdot U_f}{P_{Last}} = 106,5\% \quad (A.86)$$

Die Dauerleistung beträgt somit 106,5% der Lastleistung. Der Transformator muss bei einer Leistungsverteilung von 18:82, also um 6,5% überdimensioniert werden.

Dies ist minimal schlechter als beim Dreieck-Stern Transformator und besser als bei dem Dreieck-Dreieck-Stern Transformator bei einer Leistungsaufteilung von 50:50 (bei identischem Kern und Kupfereinsatz). Allerdings führt das Leistungsverhältnis von 18:82 zu einer Erhöhung des THDi des primären Außenleiterstromes um 7,63 % auf 24,11 % und damit zu einer Erhöhung der in das Netz eingespeisten harmonischen Ströme.

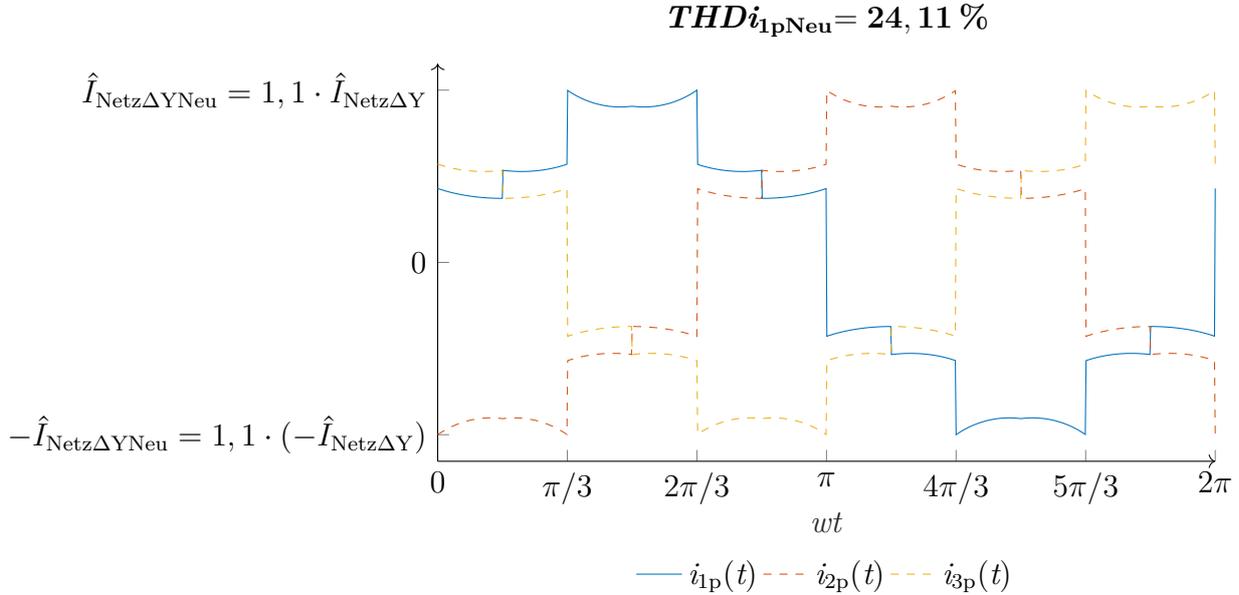


Abbildung A.2.: Netzstrom des Dreieck-Dreieck-Stern Transformators mit 12-Puls Gleichrichter

A.2. Anpassung der Kupferverteilung

Betrachtet man die Stromdichte in den Wicklungen fällt auf, dass diese unterschiedlich groß ist. Daher können die Verluste über eine Anpassung der Leiterquerschnitte für diese Schaltung noch weiter optimiert werden. Aus Gründen der besseren Verständlichkeit werden die Übersetzungsverhältnisse hier zu $\ddot{u}_\Delta = 1$ und $\ddot{u}_Y = \sqrt{3}$ angenommen, auch wenn diese in der Realität nicht vorkommen werden. Es lässt sich von ihnen aber leicht auf Übersetzungsverhältnisse wie $\ddot{u}_{\Delta\text{real}} = 100$ schließen. Das Übersetzungsverhältnis der Sekundärwicklungen zueinander bleibt somit bestehen. Alle Berechnungen werden für einen Schenkel des Transformators durchgeführt.

Setzt man die bisherigen Verhältnisse ein, ergibt sich:

$$J_{sY} = \frac{I_{12sY}}{A_{sY}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{12s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta Y} \cdot A_{s\Delta}} = 0,8165 \cdot J_{s\Delta} \quad (\text{A.87})$$

Die Stromdichte im Stern ist somit 18,35 % geringer als im sekundären Dreieck.

Das Verhältnis vom primären Strangstrom zum sekundären Strangstrom im Dreieck beträgt:

$$I_{12p\Delta} = 1,676 \cdot I_{12s\Delta} \quad (\text{A.88})$$

und der Leiterquerschnitt der Primärwicklung ist doppelt so groß.

$$A_{p\Delta} = 2 \cdot \frac{A_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (\text{A.89})$$

Für die Stromdichte auf der Primärseite ergibt sich dementsprechend:

$$J_{p\Delta} = \frac{I_{12p\Delta}}{A_{p\Delta}} = \frac{1,676 \cdot \ddot{u}_{\Delta} \cdot I_{12s\Delta}}{2 \cdot \ddot{u}_{\Delta} \cdot A_{s\Delta}} = 0,838 \cdot J_{s\Delta} \quad (\text{A.90})$$

Die Stromdichte in der Primärwicklung ist 16,2% kleiner als die in der sekundären Dreieckswicklung. Passt man nun die Verhältnisse der Leiterquerschnitte bezüglich der Verhältnisse der Ströme an, ergibt sich:

$$A_{sYNEU} = \sqrt{2} \cdot A_{s\Delta} \quad (\text{A.91})$$

$$A_{p\Delta NEU} = 1,676 \cdot \frac{A_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}} \quad (\text{A.92})$$

Dies führt dazu, dass die Stromdichte in allen Windungen des Schenkels gleich groß ist.

$$J_{sYNEU} = \frac{I_{12sY}}{A_{sYNEU}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{12s\Delta}}{\sqrt{2} \cdot A_{s\Delta}} = J_{s\Delta} \quad (\text{A.93})$$

$$J_{p\Delta NEU} = \frac{I_{12p\Delta}}{A_{p\Delta NEU}} = \frac{1,676 \cdot \ddot{u}_{\Delta} \cdot I_{12s\Delta}}{1,676 \cdot \ddot{u}_{\Delta} \cdot A_{s\Delta}} = J_{s\Delta} \quad (\text{A.94})$$

Betrachtet man die neue Gesamt-Kupfermenge erhält man folgendes:

$$Cu_{\text{gesNEU}} = N_p \cdot A_{p\Delta NEU} + N_Y \cdot A_{sYNEU} + N_{\Delta} \cdot A_{s\Delta} \quad (\text{A.95})$$

$$= (\ddot{u}_{\Delta} \cdot N_{\Delta} \cdot \frac{1,676}{\ddot{u}_{\Delta}} + \frac{N_{\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta Y}} \cdot \sqrt{2} + N_{\Delta}) \cdot A_{s\Delta} = 3,492 \cdot N_{\Delta} \cdot A_{s\Delta} \quad (\text{A.96})$$

Der Transformator besitzt nun auf einem Schenkel primär 47,995% des Kupfers, sekundär im Dreieck 28,633% und sekundär im Stern entsprechend 23,379% des Kupfers.

Das Verhältnis der Widerstände der Wicklungen verändert sich entsprechend zu:

$$R_{sYNEU} = \frac{l_{sY}}{A_{sYNEU}} = \frac{\frac{l_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta Y}}}{\sqrt{2} \cdot A_{s\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot R_{s\Delta} \quad (\text{A.97})$$

$$R_{p\Delta NEU} = \frac{l_{p\Delta}}{A_{p\Delta NEU}} = \frac{\frac{l_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}}}{1,676 \cdot \frac{A_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}}} = \frac{1}{1,676} \cdot \frac{R_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}^2} \quad (\text{A.98})$$

Bei der erneuten Betrachtung der Durchlassverluste ergibt sich somit folgendes:

$$P_{vsNEU} = P_{vsYNEU} + P_{vs\Delta} = 2 \cdot R_{sYNEU} \cdot I_{12sY}^2 + R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (\text{A.99})$$

$$= 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot R_{s\Delta} \cdot (\sqrt{2})^2 \cdot I_{12s\Delta}^2 + R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = \frac{3 + 2 \cdot \sqrt{6}}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (\text{A.100})$$

$$P_{vpNEU} = R_{p\Delta} \cdot I_{12p}^2 = R_{p\Delta NEU} \cdot \frac{12}{13} \cdot (2 \cdot I_{12pY}^2 + I_{12p\Delta}^2) \quad (\text{A.101})$$

$$= \frac{1}{1,676} \cdot \frac{R_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}^2} \cdot \frac{12}{13} \cdot \frac{7}{3} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 1,285 \cdot \frac{R_{s\Delta}}{\ddot{u}_{\Delta}} \cdot I_{s\Delta}^2 \quad (\text{A.102})$$

Die gesamten Verluste betragen folglich:

$$P_{12vCuNEU} = P_{vpNEU} + P_{vsNEU} = \frac{3 + 2 \cdot \sqrt{6}}{3} \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 + 1,285 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 \quad (\text{A.103})$$

$$= 3,918 \cdot R_{s\Delta} \cdot I_{12s\Delta}^2 = 0,8395 \cdot P_{12vCu\Delta+Y} \quad (\text{A.104})$$

Somit konnten durch Anpassung der Leiterquerschnitte eine weitere Verbesserung der Durchlassverluste im Kupfer von 12,19 % erzielt werden. Die Verluste in den Wicklungen eines Schenkels nach dem Anpassen der Leiterquerschnitte, sind dementsprechend nun um 16,05 % kleiner als bei der Verwendung eines Dreieck-Dreieck Transformators und eines Dreieck-Stern Transformators mit 6-Puls Gleichrichter.

A.3. Berechnung der Last

Bei einer Spannung von 20 V soll die Last 200 W an Leistung verheizen. Dementsprechend stellt sich in der Theorie ein Strom von 10 A ein. Bei der Parallelschaltung von vier Lagen, entfällt auf die einzelne Lage nur noch ein Strom von 2,5 A, bei einer Verlustleistung von 50 W.

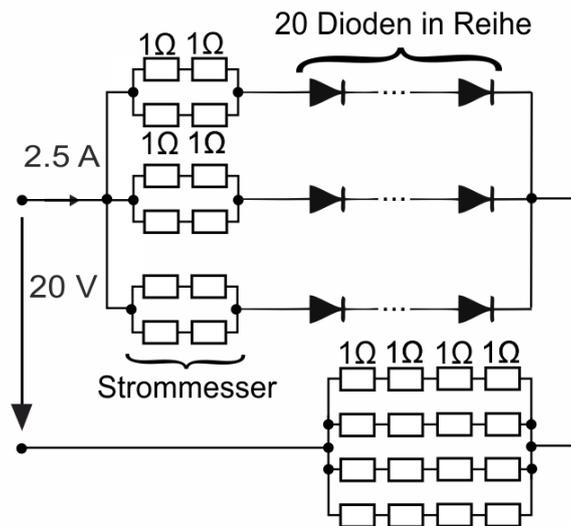


Abbildung A.3.: Schaltplan von einer Lage der Last mit einer Verlustleistung von 50 W

Um die Dioden nicht zu überhitzen, sollen an einer Diode nicht mehr als 0,7 W Verluste entstehen[24]. Durch eine Parallelschaltung von drei Strängen wird dies erfüllt. Der Strom in einem Strang beträgt dementsprechend nur noch:

$$I_{\text{StrangDiode}} = \left(\frac{2,5 \text{ A}}{3}\right)^2 = 0,694 \text{ A} \quad (\text{A.105})$$

Die Parallelschaltung der Widerstände erzeugt entsprechend 0,694 W Verluste, da sie einen Gesamtwiderstand von 1 Ω hat und jeder einzelne Widerstand macht dementsprechend 0,1735 W Verluste.

$$R_{\text{ges}} = \frac{(1 \Omega + 1 \Omega) \cdot (1 \Omega + 1 \Omega)}{1 \Omega + 1 \Omega + 1 \Omega + 1 \Omega} = 1 \Omega \quad (\text{A.106})$$

$$P_{\text{Rges}} = \left(\frac{2,5 \text{ A}}{3}\right)^2 \cdot 1 \Omega = 0,694 \text{ W} \quad (\text{A.107})$$

An jeder Diode fallen ebenfalls 0.694 W ab. Somit ergibt sich für jeden der drei Stränge ein Verlustleistung von:

$$P_{\text{Strang}} = 21 \cdot 0,694 \text{ W} = 14,574 \text{ W} \quad (\text{A.108})$$

Zieht man diese von den 50 W Verlustleistung ab, die jede PCB machen soll, bleiben noch 6,278 W.

$$P_{\text{RStrangges}} = 50 \text{ W} - 14,574 \text{ W} \cdot 3 = 6,278 \text{ W} \quad (\text{A.109})$$

Da ein Widerstand nicht mehr als 0,4 W Verluste erzeugen sollen[25], ergibt sich daraus eine Parallelschaltung von vier Strängen.

$$P_{\text{R}} = \left(\frac{2,5 \text{ A}}{4}\right)^2 \cdot 1 \Omega = 0,3906 \text{ W} \quad (\text{A.110})$$

Dementsprechend müssen pro Strang vier 1 Ω Widerstände in Reihe geschaltet werden.

$$\text{Widerstände in Reihe} = \frac{\frac{6,278 \text{ W}}{4}}{0,3906 \text{ W}} = 4,018 \quad (\text{A.111})$$

Die Abweichung ist hinreichend gering, um sie vernachlässigen zu können, da an den Leitungen zwischen den Bauteilen zusätzlich Verluste entstehen. Die Berechnungen habe ich überprüft, indem ich die an der PCB anliegende Spannung berechnet habe. Die Spannung, welche an den drei Strängen anliegt beträgt somit:

$$U_{\text{Strang}} = \frac{14,574 \text{ W}}{0,833 \text{ A}} = 17,496 \text{ V} \quad (\text{A.112})$$

und die Spannung welche an den vier Widerstandssträngen anliegt beträgt:

$$U_{\text{RStrang}} = \frac{6,278 \text{ W}}{2,5 \text{ A}} = 2,511 \text{ V} \quad (\text{A.113})$$

Es liegt an der PCB somit eine gesamt Spannung von 20 V an. In der Theorie ergibt sich somit bei einer parallel Schaltung der vier Lagen die Strom-Spannungskennlinie aus Grafik A.4.

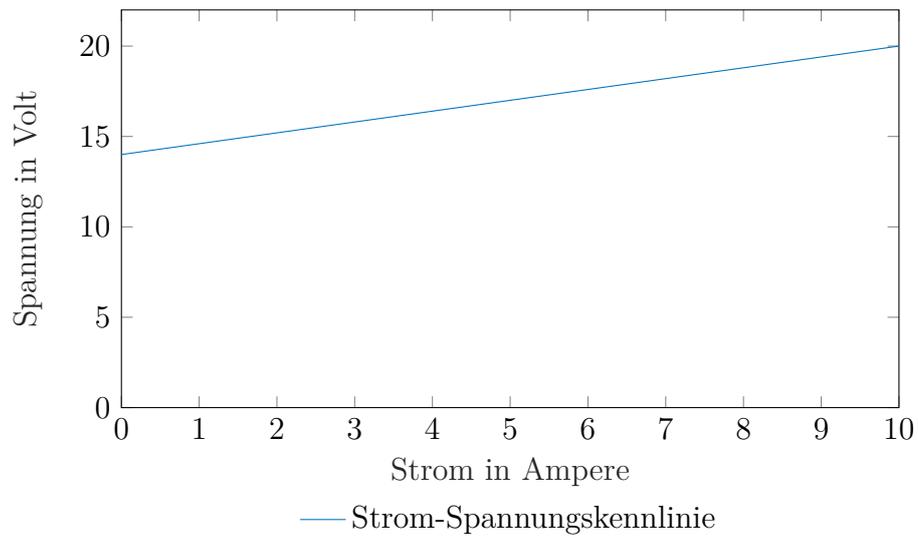
Strom-Spannungskennlinie der Last bei vier parallelen Lagen

Abbildung A.4.: Strom-Spannungskennlinie bei parallel Schaltung der vier Lagen

Literaturverzeichnis

- [1] UHLIG, Jeanette: Wasserstoff / Deutsche Energie Agentur GmbH (dena). Version: 2020. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena-FACTSHEET_Wasserstoff_PtG.pdf. 2020. – Forschungsbericht
- [2] *Agora Energiewende.* : *Agora Energiewende*, https://www.agora-energiewende.de/service/agorameter/chart/power_generation/25.07.2022/31.07.2022/today/
- [3] *Energie-Charts.* : *Energie-Charts*, https://energy-charts.info/charts/price_spot_market/chart.htm?l=de&c=DE&legendItems=111101&interval=week&stacking=stacked_absolute_area&week=30&download-format=image/png
- [4] IRENA: Innovation landscape brief: Renewable Power-to-Hydrogen / International Renewable Energy Agency. Version: 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Power-to-Hydrogen_Innovation_2019.pdf. Abu Dhabi, 2019. – Forschungsbericht
- [5] STUMPF, Annette ; VARTMANN, Alex: Wasserstoff aus Ökostrom günstiger erzeugen / Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Version: April 2019. https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Pressemitteilungen/2019/pi07-2019-ZSW-ForschungsplattformPtG-AnlageWyhlengestartet.pdf. 2019 (7). – Presseinformation
- [6] CHEN, Mengxing ; CHOU, Shih-Feng ; BLAABJERG, Frede ; DAVARI, Pooya: Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis. In: *applied sciences* (2022), Dezember. <http://dx.doi.org/10.3390>. – DOI 10.3390
- [7] STAIGER, Robert ; TANȚĂU, Adrian: Grundlagen zum Forschungsgebiet. In: *Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff*. Springer, 2020, S. 1–32
- [8] BULLMANN, Till ; GOLLNICK, Christian ; SCHORPP, Julian: Wasserstoff DIHK-Faktenpapier / Deutscher Industrie-und Handelskammertag e.V. (DIHK). Version: Juni 2020. <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>. 2020. – Forschungsbericht
- [9] DESTATIS: KORREKTUR: Stromerzeugung 2020: 5,9 eingespeißt als 2019 / Statistisches Bundesamt (Destatis). Version: März 2021. <https://www.destatis.de/DE/>

- [Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_101_43312.html](https://www.presseportal.de/pm/11191/2021/03/PD21_101_43312.html). 2021 (101). – Forschungsbericht
- [10] JINS, Alunkal J.: *Optimisation of 100MW PEM Electrolysis Systems considering Efficiency, Storage and Costs*, Universität Paderborn, Masterarbeit, Mai 2022. <http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2008.233>. – DOI 10.1109/TPDS.2008.233
- [11] DEUTSCHER BUNDESTAG, FACHBEREICH: WIRTSCHAFT UND LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG (Hrsg.): *Wasserstoffbedarf*. Deutscher Bundestag: Deutscher Bundestag, Fachbereich: Wirtschaft und Landwirtschaft, Ernährung, März 2022. <https://www.bundestag.de/resource/blob/894040/0adb222a2cbc86a20d989627a15f4bd8/WD-5-024-22-pdf-data.pdf>
- [12] YODWONG, Burin ; GUILBERT, Damien ; PHATTANSAK, Matheepot ; KAEWMANEE, Wattan ; GIANPAOLO VITALE, Melika H.: AC-DC Converters for Electrolyzer Applications: State of the Art and Future Challenges. In: *electronics* (2020), Mai. <http://dx.doi.org/10.3390>. – DOI 10.3390
- [13] TJARKS, Geert: *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen*, Lehrstuhl für Brennstoffzellen (FZ Jülich), Doktorarbeit, 2017. <https://publications.rwth-aachen.de/record/689617/files/689617.pdf>
- [14] SCHENKE, Dr.-Ing. S.: *Grundlagen der Elektrotechnik - das interaktive Skript - Teil 2: Wechselspannung*. Dr.-Ing. Stefan Schenke, 2022
- [15] BRAGA, Henrique B.: THDI – NEW STANDARDS AND THE IMPACT FOR THE UPS INDUSTRIAL APPLICATION. <https://www.aegps.com/en/technology/articles/thdi/>
- [16] *Definition der Leistungsmessgrößen nach den Normen -DIN 40110-2 und IEEE 1459 -. : Definition der Leistungsmessgrößen nach den Normen -DIN 40110-2 und IEEE 1459 -. a-eberle*. – Infobrief Nr. 25
- [17] TZENG, Yii-Shen ; CHEN, Nanming ; WU, Ruay-Nan: Modes of Operation in Parallel-Connected 12-Puls Uncontrolled Bridge Rectifiers Without an Interphase Transformer. In: *TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* 44 (1997), Juni, Nr. 3
- [18] *IEC 61000-6-2, Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 6-2: Generic Standards-Immunity Standard for Industrial Environment*. <https://webstore.iec.ch/publication/25630>
- [19] DIOTEC SEMICONDUCTOR AG: SB 12100 DIO Schottkydiode, 100 V, 12 A, Axial. <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A400/HYSB1220.1..pdf>. reichelt, Artikel-Nr.: SB 12100 DIO, . – Typ SB 12100 DIO

- [20] KINGBRIGHT: LED 10MM GN LED, 10 mm, bedrahtet, grün, 60 mcd, 60°. https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A500/LED10MMRT_LED10MMGE_LED10MMGN#KIN.pdf. reichelt, Artikel-Nr.: LED 10MM GN, . – 10mm SOLID STATE LAMPS
- [21] TRANSFORMATOREN TECHNOLOGIE FRIESLAND GMBH: TTF DTE 250/12 Drehstromtrenntrafo, 250VA, 400/12V. https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/C500/DT-E250400-12_TTF.pdf. reichelt, Artikel-Nr.: TTF DTE 250/12, . – Typ DT-E 250 400-12
- [22] BÖCKER, Prof. Dr.-Ing. J.: Elektrische Antriebstechnik. Universität Paderborn : Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Januar 2020 (Stand vom 21.01.2020)
- [23] WÜRTH ELEKTRONIK eISOS GMBH & Co. KG: Festinduktivitäten WE-FI Toroidal Choke 150uH 5.4A 42mOhms. <https://www.mouser.de/datasheet/2/445/7447055-1921232.pdf>. mouser, Artikel-Nr.: 710-7447055, . – Herst.-Nr.: 7447055
- [24] HY: 1N 5059 Gleichrichterdiode, 200 V, 2 A, DO-15 / SOD-57. https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A400/1N5059-1N5060_1N5061_1N5062_HY.pdf. reichelt, Artikel-Nr.: 1N 5059, . – Typ 1N 5059
- [25] YAGEO EUROPE GMBH: METALL 1,00 Widerstand, Metallschicht, 1,0 Ohm, 0207, 0,6 W, 1 <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B400/METALL#YAG.pdf>. reichelt, Artikel-Nr.: METALL 1,00, . – Typ MF0204