



Fachbereich Ingenieurwissenschaften  
und Kommunikation (IWK)  
Studiengang Elektrotechnik M. Eng.  
Vertiefungsrichtung Elektronische Systementwicklung

Master-Thesis

# **Netzdienliche Wasserstoff-Elektrolysegleichrichter: Eine Analyse von IAF und 1/3 PWM PFC Rectifier in der Leistungsklasse 400 kVA**

Vorgelegt von:

Jonas Heinemann  
Cecilienstraße 28  
53840 Troisdorf  
Tel. 015783841858  
Jonas.Heinemann@h-brs.de  
Matr.-Nr. 9031399

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Marco Jung  
Zweitprüfer: Prof. Dr. Heinrich Richard Salbert

Troisdorf, den 20.01.2024

## **Erklärung zur Master-Thesis**

„Ich versichere hiermit, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Mir ist bewusst, dass sich die Hochschule vorbehält, meine Arbeit auf plagiierte Inhalte hin zu überprüfen und dass das Auffinden von plagiierten Inhalten zur Nichtigkeit der Arbeit, zur Aberkennung des Abschlusses und zur Exmatrikulation führen können.“

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

---

Um in Zukunft unabhängiger von Importen zu sein und die Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten, hat die Bundesregierung das Ziel für die Erzeugung von grünem Wasserstoff durch Elektrolyse von fünf auf zehn Gigawatt Leistung im Jahr 2030 angehoben. Davon sollen drei Gigawatt systemdienlich sein [6]. Dies zeigt, wie wichtig es ist, die Elektrolyse für zukünftige Szenarien vorzubereiten. Um darüber hinaus das Ziel rein erneuerbarer Energien im Stromnetz zu erreichen, ist es notwendig, die Anforderungen an größere Lasten zu verändern. Dies betrifft die Systemdienstleistungen, die bisher vor allem von zentralen Großkraftwerken erbracht werden. Zukünftig sollen in Deutschland Wasserstoff-Elektrolyseanlagen in der Leistungsklasse von mehreren Megawatt aufgebaut werden, die viele Möglichkeiten bieten, das Stromnetz durch Dynamik und Regelung zu unterstützen. Daher werden in dieser Arbeit Stromrichter für die Anwendung der Wasserstoffelektrolyse untersucht, die innovative Ansätze und eine optimierte Betriebsführung ermöglichen. Anhand einer Vorauswahl werden die relevanten Topologien auf den Integrated Active Filter (IAF) und Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier (1/3-PWM-PFC) eingegrenzt, diese werden detailliert untersucht und durch Simulationsmodelle charakterisiert.

Zum abschließenden Vergleich der Modelle erfolgt eine Bewertung anhand des Bedarfs an induktiven und Halbleiterbauelementen sowie der Halbleiterverluste aus dem Simulationsmodell. Diese Größen werden in den einzelnen Kategorien normiert und über Gewichtungsfaktoren zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf zukünftige Schritte wie die Optimierung der Halbleitermodelle durch Messungen und den Aufbau eines Demonstrators gegeben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Wasserstoff-Elektrolyse . . . . .	4
2.2 Stromrichter . . . . .	5
2.2.1 Gleichrichter . . . . .	5
2.2.2 DC-DC Wandler . . . . .	6
2.2.3 Power Factor Correction (PFC) . . . . .	7
2.3 IAF Rectifier . . . . .	8
2.4 1/3 PWM PFC Rectifier . . . . .	9
2.5 Leistungshalbleiter . . . . .	10
2.6 Induktive Komponenten . . . . .	11
2.7 Simulationssoftware . . . . .	11
2.7.1 PLECS . . . . .	12
<b>3 Anforderungen</b>	<b>13</b>
3.1 Stromnetz . . . . .	13
3.1.1 Systemdienstleistungen (SDL) . . . . .	14
3.1.2 Fault-Ride-Through (FRT) . . . . .	15
3.2 Elektrolyseur . . . . .	16
3.3 Zusammenfassung . . . . .	16
3.4 Bewertungskriterien . . . . .	16
<b>4 Vorauswahl</b>	<b>17</b>
4.1 Mögliche Topologien . . . . .	17
4.1.1 6-Switch Boost PFC Rectifier . . . . .	17
4.1.2 Vienna Rectifier . . . . .	17
4.1.3 6-Switch Buck PFC Rectifier . . . . .	18
4.1.4 Swiss Rectifier . . . . .	18
4.1.5 2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier . . . . .	19
4.1.6 Trident Rectifier . . . . .	19
4.1.7 Y-Rectifier . . . . .	20
4.2 Auswahl der Topologien . . . . .	20

<b>5 Simulation</b>	<b>22</b>
5.1 Randbedingungen . . . . .	24
5.2 Tiefsetzsteller . . . . .	24
5.2.1 Auslegung der Induktivität . . . . .	24
5.2.2 Regelung . . . . .	25
5.3 IAF . . . . .	25
5.3.1 Auslegung der Induktivitäten . . . . .	25
5.3.2 Regelung . . . . .	26
5.4 B6 1/3 PFC Buck . . . . .	29
5.4.1 Auslegung der Netzinduktivität . . . . .	30
5.4.2 Regelung . . . . .	30
<b>6 Auswertung</b>	<b>33</b>
6.1 B6PFC . . . . .	35
6.2 IAF . . . . .	38
<b>7 Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>42</b>
<b>Literatur</b>	<b>44</b>
<b>Inhalt der CD</b>	<b>46</b>
<b>Anhang</b>	<b>47</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1-1	Systemkosten PEM Elektrolyse . . . . .	2
1.1-2	Elektrolyse Kapazität bis 2030 . . . . .	2
2.1-1	Elektrolyseur Spannungseffizienz . . . . .	5
2.2.1-1	Diodengleichrichter (a) mit Strom und Spannungsverlauf (b) . . . . .	6
2.2.2-1	Tiefsetzsteller . . . . .	7
2.3-1	IAF Gleichrichter Topologie . . . . .	8
2.4-1	1/3 PWM PFC Topologie mit Tiefsetzsteller . . . . .	9
2.4-2	Sektorenaufteilung und Schaltverhalten von IAF und B6 1/3 [8] . . . . .	10
2.5-1	Darstellung der Ausschaltverluste [9] . . . . .	11
2.7.1-1	Tiefsetzsteller mit Effizienzbestimmung . . . . .	12
3.1-1	Zulässiger Bereich des Verschiebungsfaktors $\cos \phi$ bei Wirkleistungsbezug . . . . .	13
3.1-2	quasistationären Betrieb (a) und Fault-Ride-Through (FRT) (b) . . . . .	14
3.1.1-1	Technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen Stand 2019 .	15
4.1.1-1	Six Switch Boost PFC Rectifier . . . . .	17
4.1.2-1	Vienna Rectifier . . . . .	18
4.1.3-1	Six Switch Buck PFC Rectifier . . . . .	18
4.1.4-1	Swiss Rectifier . . . . .	19
4.1.5-1	2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier . . . . .	19
4.1.6-1	Trident Rectifier . . . . .	19
4.1.7-1	Y Rectifier . . . . .	20
5-1	Übersicht der PLECS Simulation . . . . .	22
5-2	Zusammenfassung der Simulationsoutputs . . . . .	23
5.3-1	Simulationsaufbau der Halbleiter des IAF . . . . .	25
5.3-2	Simulationsaufbau der Halbleiter des IVS vom IAF . . . . .	26
5.3.2-1	Regelung des Tiefsetzstellers des IAF . . . . .	27
5.3.2-2	Struktur der Regelung des IAF [16] . . . . .	27
5.3.2-3	PLECS Aufbau der Input Voltage Selector (IVS) Ansteuerung . . . . .	28
5.3.2-4	Bestimmung des Sollstroms der mittleren Phase . . . . .	28
5.3.2-5	Regelung des Stroms in der mittleren Phase . . . . .	29
5.4-1	PLECS Aufbau der B6 Leistungshalbleiter . . . . .	29
5.4-2	PLECS Aufbau des Tiefsetzstellers der B6 Topologie . . . . .	30
5.4.2-1	Regelung des 1/3-PWM-PFC . . . . .	31
5.4.2-2	PLECS Regelung der Ausgangsleistung als Sollgröße . . . . .	31
5.4.2-3	PLECS Regelung der Netzimpedanz und Phasenabschnittserkennung .	32
5.4.2-4	PLECS PWM Erzeugung des B6 Gleichrichters . . . . .	32
6.1-1	Temperaturverhalten der Halbleiter des B6 mit (voll dargestellt) und ohne (schwach dargestellt) Phasenverschiebung . . . . .	35
6.1-2	Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne Phasenverschiebung . . . . .	36

---

*Abbildungsverzeichnis*

---

6.1-3	Eingangs- und Ausgangsgrößen mit Phasenverschiebung . . . . .	37
6.2-1	Temperaturverhalten der Halbleiter des IAF ohne (a) und mit (b) Phasenverschiebung . . . . .	39
6.2-2	Simulationsergebnisse des IAF ohne Phasenverschiebung, Eingangsspan- nung und Ströme, Strom in der IVS Induktivität . . . . .	40
6.2-3	Simulationsergebnisse des IAF bei 30 Grad Phasenverschiebung, Ein- gangsspannung und Ströme, Strom in der IVS Induktivität . . . . .	41
7-1	Doppelpulstestprüfstand . . . . .	42
7-2	Strompfad im Fall eines Blitzeinschlag beim IAF . . . . .	43

# **Tabellenverzeichnis**

3.3-1	Anforderungen an den Gleichrichter Aktuell und in Zukunft . . . . .	16
4.2-1	Topologievergleich zur Vorauswahl . . . . .	21
6-1	Auflistung der Simulationsbetriebsparameter . . . . .	33
6-2	Auflistung der Simulationsergebnisse und Bewertung . . . . .	34

# Abkürzungsverzeichnis

$I_a$	Ausgangsstrom
$R_{DSon}$	Einschaltwiderstand
$R_{GV}$	Gatevorwiderstand
$S$	Scheinleistung
$U_{GS}$	Gate-Source-Spannung
$U_{LL}$	Leiterleiterspannung
$U_a$	Ausgangsspannung
$U_e$	Eingangsspannung
$U_{pn}$	Zwischenkreisspannung
1/3-PWM-PFC	Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier
AEL	alkalische Elektrolysetechnik
AFE	active front end
D	Tastverhältnis
DPT	Doppelpulstest
FRT	Fault-Ride-Through
HTEL	Hoch Temperatur Elektrolyse
IAF	Integrated Active Filter
IRENA	Internationale Organisation für Erneuerbare Energien
IVS	Input Voltage Selector
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistors
PEM	proton Exchange Membrane bzw. Polymer Electrolyte Membrane
PFC	Power Factor Correction
PLECS	PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation)
PWM	Pulsweiten Modulation
SDL	Systemdienstleistungen
TAR	Technische Anschlussregeln
THD	Total Harmonic Distortion
THI	third harmonic injection
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik



# 1 Einleitung

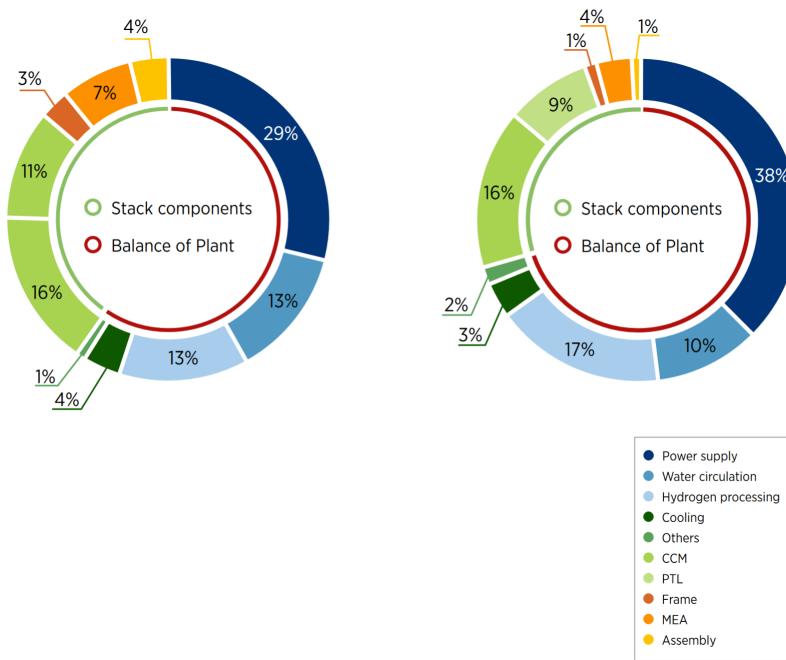
Um die Klimaschutzziele zu erreichen, wird eine Vielzahl von Maßnahmen notwendig sein, die nur im Zusammenspiel zum Erfolg führen können. Ein großes Problem bei der Nutzung erneuerbarer Energien ist deren Volatilität, daher sind deutlich größere Speichermöglichkeiten erforderlich. Ein Medium für die langfristige Speicherung und den Transport von Energie bietet Wasserstoff, der auf unterschiedliche Weise gewonnen werden kann und vielfältige Einsatzmöglichkeiten bietet. In der Industrie wird Wasserstoff bereits heute in großem Umfang eingesetzt. In den meisten Fällen wird er jedoch durch Dampfreformierung direkt am Einsatzort aus Erdgas gewonnen. Zukünftig kann er durch den Einsatz von Elektrolysezellen mit erneuerbaren Energien nachhaltig erzeugt werden [17].

## 1.1 Stand der Technik

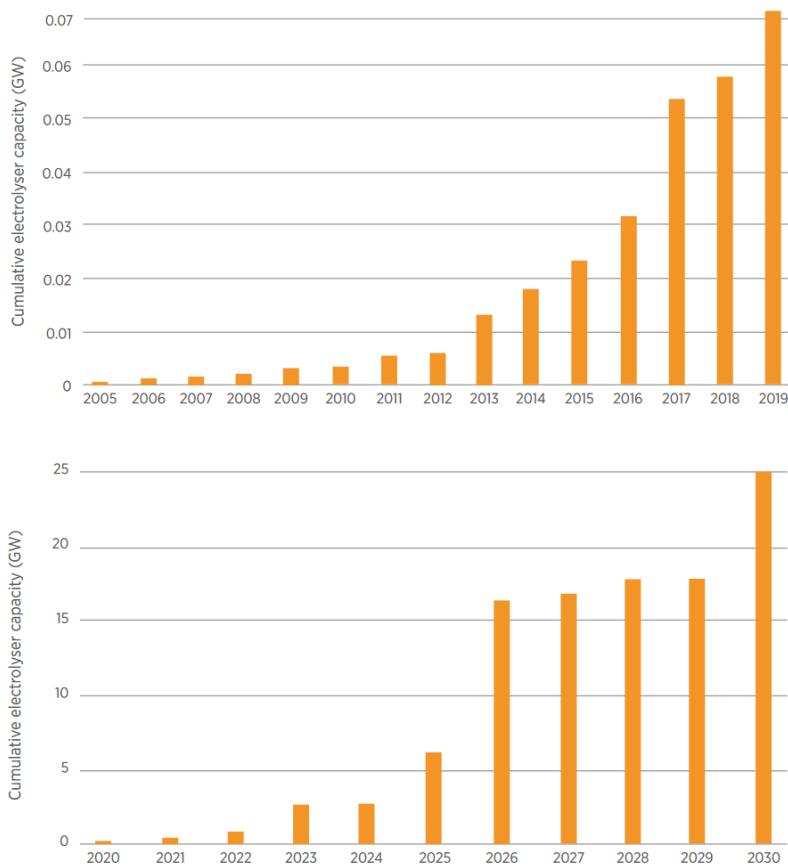
Aktuelle Ansätze für Hochleistungsgleichrichter für die Elektrolyse sind in [20] dargestellt, beschränken sich aber auf einzelne Anwendungsfälle. Die Entwicklung der Elektrolyse schreitet sehr schnell voran und in den nächsten Jahren sind Veränderungen zu erwarten, die auch die Stromversorgung betreffen. Insbesondere der Trend zu höheren Spannungsklassen ermöglicht eine Kostenreduktion auf Seiten der Leistungselektronik. Die optimale Auslegung der Elektrolyseanlage hängt jedoch von vielen anwendungsspezifischen Parametern wie z.B. der Betriebsführung ab. Insbesondere die Entwicklung des Strompreises und die Netzstabilität in der Zukunft können die Amortisation stark beeinflussen. Durch Gleichrichter, die das Netz unterstützen, anstatt es z.B. durch Blindleistungsbezug zu belasten, können Elektrolyseure ohne zusätzliche Kompensationsanlagen günstiger betrieben werden. Darüber hinaus kann durch Frequenzstabilisierung und andere Systemdienstleistungen (SDL) zusätzliche Vergütung generiert werden.

Die Internationale Organisation für Erneuerbare Energien (IRENA) hat in ihrem Bericht über die Kostenentwicklung der Elektrolyse im Jahr 2020 den Anteil der Kosten für die Stromversorgung für proton Exchange Membrane bzw. Polymer Electrolyte Membrane (PEM)-Elektrolyseure mit 29 bis 38 Prozent angegeben. Wobei die Elektrolysezellen selbst weniger als die Hälfte der Kosten ausmachen. Darüber hinaus werden als mögliche Faktoren zur Senkung der Gleichrichterkosten Skaleneffekte, die Standardisierung von Komponenten sowie die Beteiligung von Unternehmen aus der Elektronikindustrie anstelle von Elektrolyseurherstellern genannt [10].

Die Abb. 1.1-2 zeigt zudem, dass der Ausbau der Elektrolyse in den letzten Jahren enorm zugenommen hat und in Zukunft noch deutlich zunehmen wird. Die weltweite Leistung hat gerade den Gigawatt-Bereich erreicht und soll allein in Deutschland bis 2030 auf mindestens zehn Gigawatt ausgebaut werden.



**Abbildung 1.1-1:** Systemkosten PEM Elektrolyse links 10 MW pro Jahr, rechts 1 GW pro Jahr [10]



**Abbildung 1.1-2:** Elektrolysekapazität Stand 2020 mit Ausblick bis 2030 [10]

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Ziel ist es, die beiden ausgewählten Stromrichtertopologien (IAF und 1/3-PWM-PFC) anhand detaillierter Simulationen unter vorgegebenen Randbedingungen zu vergleichen, um eine eindeutige Bewertung vornehmen zu können. Dazu werden zunächst die Randbedingungen der Schnittstellen Elektrolyseur und Stromnetz definiert, um diese in einer Simulation mit Matlab und der Erweiterung PLECS abzubilden. Durch die Modellierung der Halbleiter kann die Verlustleistung und damit der Wirkungsgrad und indirekt der Kühllaufwand abgeschätzt werden. Zusätzlich kann durch die in den magnetischen Komponenten gespeicherte Energie deren Größe und Kosten abgeschätzt werden, da diese den größten Anteil an den Gesamtkosten eines Umrichters ausmachen. Weitere Komponenten wie Treiberschaltungen und benötigte Kapazitäten spielen bei der Bewertung eine untergeordnete Rolle. Um die Bereitstellung von Systemdienstleistungen zu berücksichtigen, wird die Verlustleistung bei einer Phasenverschiebung von 30 Grad und 0 Grad betrachtet. Anschließend erfolgt eine Gesamtbewertung durch Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kategorien.

## 2 Grundlagen

Die Leistungselektronik ist ein komplexes Thema, das im Grunde mit den Anfängen der Elektrizität beginnt, wobei die Umwandlung und Übertragung von Strom die ersten großen Hürden darstellen. Insbesondere die Entscheidung zwischen Wechsel- und Gleichstrom in den Übertragungs- und Verteilungsnetzen war eine erste große Debatte. Mit der Weiterentwicklung der Halbleitertechnik zeigte sich, dass die Gleichstromtechnik vor allem bei langen Übertragungsstrecken Vorteile gegenüber der verbreiteten Wechselstromtechnik hat. Um die Anforderungen und Zusammenhänge verstehen zu können, werden Details zur Elektrolyse, zu Stromrichtern und Komponenten sowie zur verwendeten Simulationsumgebung vorgestellt.

### 2.1 Wasserstoff-Elektrolyse

Das Prinzip der alkalischen Elektrolysetechnik (AEL) ist, im Gegensatz zur neueren PEM, Elektrolyse, bereits seit langem bekannt und optimiert. Die AEL benötigt in der Regel eine wässrige KOH-Lauge und kann durch Reihenschaltung der Zellen Wasserstoff und Sauerstoff unter erhöhtem Druck von z.B. 30 bar bereitstellen. Die Entwicklung und insbesondere die Steigerung der Stromdichte und des Wirkungsgrades haben in den letzten Jahren keine großen Veränderungen gebracht. Der Spannungswirkungsgrad liegt zwischen 62 und 82 Prozent [18].

Die PEM-Elektrolyse bietet Vorteile durch erhöhte Stromdichte, bei größeren Anlagen spart dies unter anderem Platz, außerdem ist zu erwarten, dass Druckelektrolyse bis 100 bar möglich wird. Dies erhöht den Gesamtwirkungsgrad durch Einsparung von Kompressoren. Optimierungsbedarf besteht jedoch noch bei der Lebensdauer der Membranen und den benötigten Edelmetallen [18].

Die Hoch Temperatur Elektrolyse (HTEL) nutzt die Vorteile höherer Temperaturen, die thermodynamische Vorteile für den elektrischen Wirkungsgrad bringen, jedoch hohe Anforderungen an die verwendeten Materialien stellen. Daher befindet sich die Festoxidelektrolyse noch im Stadium der Grundlagenforschung im Labor. Da fast alle Festoxidzellen reversible Eigenschaften besitzen, ist das Interesse an ihnen besonders groß, da dies eine direkte Rückverstromung des Wasserstoffs ermöglicht. Allerdings sind auch hier noch Materialoptimierungen und Verbesserungen der Langzeiteigenschaften notwendig.

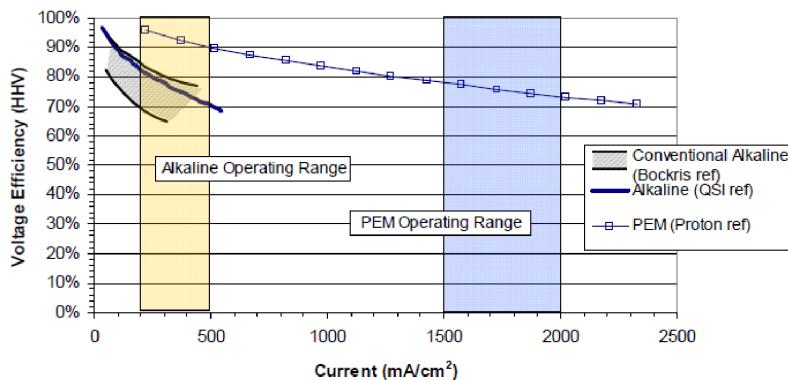


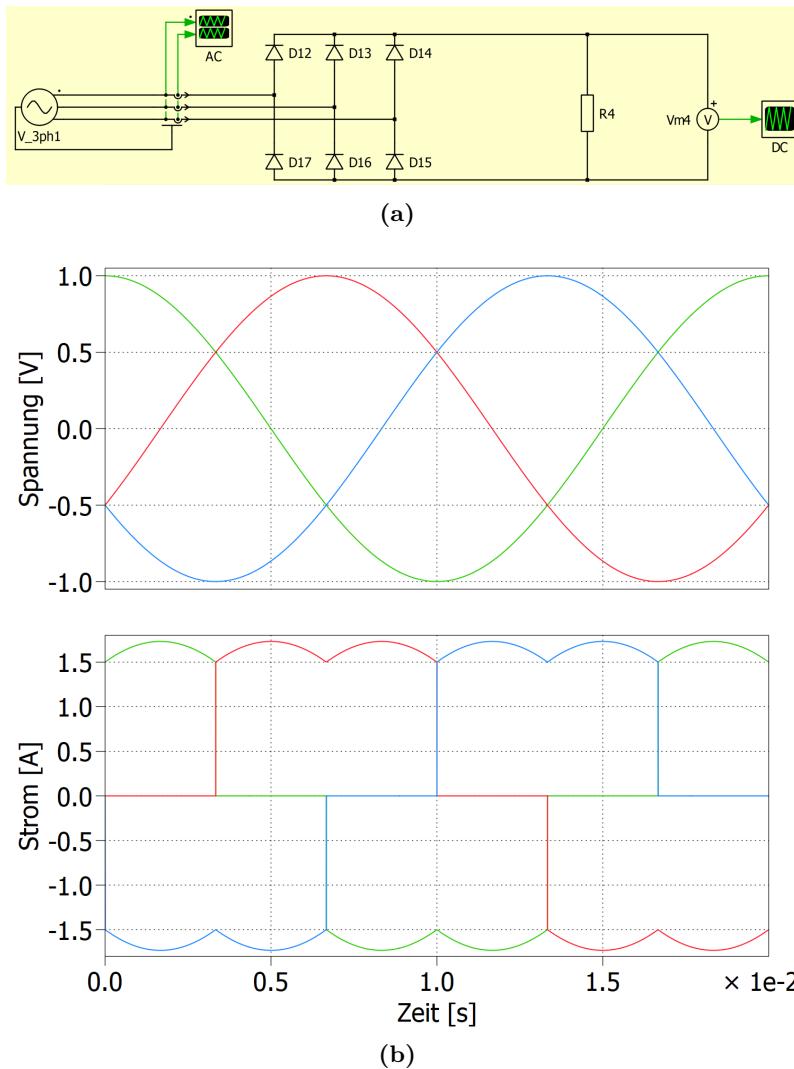
Abbildung 2.1-1: Elektrolyseur Spannungseffizienz [18]

## 2.2 Stromrichter

Allgemein kann jede Schaltung zur Strom- und Spannungsversorgung als Stromrichter bezeichnet werden, wobei zwischen AC- und DC-Varianten unterschieden wird. Weiterhin kann bei Netzanwendungen zwischen geregelt, netzgesteuert und ungesteuert unterschieden werden, sowie die Implementierung einer Power Factor Correction (PFC) betrachtet werden [15].

### 2.2.1 Gleichrichter

Ein Gleichrichter wird genutzt, um aus einer Wechselspannung eine Gleichspannung zu erzeugen. Die einfachste Form ist der Diodengleichrichter. Dieser kann für einphasige Wechselspannung durch eine einzelne Diode realisiert werden. Allerdings würde so nur die halbe Periode des Sinus am Ausgang zur Verfügung stehen, da die Diode nur während der positiven Halbwelle leitet. Dies kann durch die Ergänzung eines Brückengleichrichters mit vier Dioden für einphasige Anwendungen und sechs Dioden für dreiphasige Anwendungen erreicht werden. Der Diodengleichrichter ist jedoch nur bedingt für einen gewünschten Stromverlauf geeignet. In Abbildung 2.2.1-1 ist der Diodengleichrichter mit Netzspannung und Strom dargestellt. Der Stromverlauf zeigt starke Sprünge und der gewünschte sinusförmige Verlauf ist nur schwer erkennbar. Außerdem ist es mit dieser Schaltung nicht möglich, die Ausgangsspannung oder den Strom zu variieren.



**Abbildung 2.2.1-1:** Diodengleichrichter (a) mit Strom und Spannungsverlauf (b)

Für Elektrolyseanlagen mit mehreren Megawatt Leistung ist eine Parallelisierung der Leistungshalbleiter notwendig, da bei Spannungen bis 1000 V die Ströme für einzelne Halbleiter zu hoch sind. Außerdem bietet die Parallelisierung durch Interleaving und Phasenverschiebung deutliche Vorteile bei der Verzerrung und damit der Filterung. Mit thyristorbasierten Schaltungen können große Leistungen effizient umgesetzt werden, allerdings führen sie zu deutlichen Verzerrungen im Stromverlauf und zu einem schlechteren Leistungsfaktor. Sie erfordern daher passive oder aktive Filter, die die Systemkosten erhöhen [7]. Als Alternative werden active front end (AFE) Gleichrichter eingesetzt, die wesentlich geringere Verzerrungen und völlige Freiheit bei der Regelung des Eingangsstroms bieten. Auf Filter und Blindleistungskompensation kann in diesem Fall verzichtet werden [7].

## 2.2.2 DC-DC Wandler

Der Hochsetzsteller und der Tiefsetzsteller sind grundlegende Topologien, die im Wesentlichen aus zwei Halbleitern und einer Induktivität bestehen. In Abb. 2.2.2-1 ist die Schaltung eines Tiefsetzstellers dargestellt. Über die Tastverhältnis (D) des Schalters kann die Ausgangsspannung ( $U_a$ ) eingestellt werden, wobei die Parameter Eingangsspannung

( $U_e$ ), Lastimpedanz sowie der Wert der Induktivität relevant sind. Die Ausgangsspannung kann für den Betrieb ohne Unterbrechung über die Beziehung  $U_{out} = D \cdot U_{in}$  berechnet werden [12].

Die Speicherdiode des Tiefsetzstellers kann nach der Formel 2.2.2-1 ausgelegt werden,

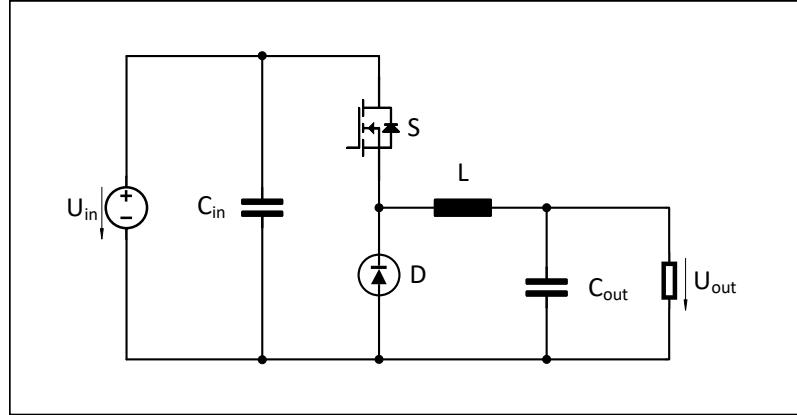


Abbildung 2.2.2-1: Tiefsetzsteller

wobei der gewünschte Stromrippel beispielhaft auf maximal 30 Prozent des Ausgangstrom ( $I_a$ ) festgelegt wird [12].

$$L = \frac{U_{emax} - U_a}{f \cdot 0,3 \cdot I_a} \cdot \frac{U_a}{U_{emax}} \quad (2.2.2-1)$$

Wird die Eingangsspannung durch einen dreiphasigen Diodengleichrichter, wie in Abb. 2.2.1-1 dargestellt, implementiert, so kann die Eingangsspannung mit  $U_{LL} \cdot \sqrt{2}$  berechnet werden. Daraus ergibt sich die Formel 2.2.2-2 bezogen auf die Phasenspannungen.

$$L = \frac{U_{LL} \cdot \sqrt{2} - U_a}{f \cdot 0,3 \cdot I_a} \cdot \frac{U_a}{U_{LL} \cdot \sqrt{2}} \quad (2.2.2-2)$$

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bietet das Interleaving, bei dem zwei Kreise parallel betrieben werden und die Regelung so gekoppelt ist, dass sie abwechselnd schaltet. Dadurch können einerseits die Drosseln besser ausgenutzt und andererseits die Welligkeit des Stroms halbiert werden.

### 2.2.3 Power Factor Correction (PFC)

Die PFC ist eine notwendige Maßnahme, um den Blindleistungsanteil im Netz zu reduzieren und ist daher in heutigen Geräten standardmäßig implementiert. Ein Beispiel aus der Industrie, bei dem eine einfache Blindleistungskompensation bereits realisiert wurde, sind Leuchten mit Halogenlampen. Diese waren mit einem Transformator zur Erzeugung der notwendigen Spannung ausgestattet, der jedoch Blindleistung verursachte, was durch einfaches Hinzufügen eines Kondensators optimiert werden konnte.

In herkömmlichen Gleichrichtersystemen werden getrennte Einheiten, bestehend aus einer dreiphasigen PFC-Gleichrichterschaltung und einem Gleichspannungswandler (DC/DC-Buck-Wandler), eingesetzt, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Regelung der beiden Wandlerstufen erfolgt in der Regel entkoppelt, wobei der Gleichrichter sinusförmige Netz-

ströme aufnimmt und der nachfolgende DC/DC-Wandler die Spannung an die erforderliche Ausgangsspannung anpasst. Das Streben nach kompakten und leichten Systemen erfordert hohe Schaltfrequenzen, die jedoch zu erhöhten Schaltverlusten und verringertem Wandlerwirkungsgrad führen können. Um dieses Problem zu lösen, können fortgeschrittene Modulationstechniken wie die Einfügung der dritten Harmonischen und Raumzeigermodulation eingesetzt werden. Alternativ kann die diskontinuierliche Pulsweitenmodulation (DPWM) als Methode zur Reduzierung der Schaltverluste in dreiphasigen PFC-Gleichrichtern eingesetzt werden, um sinusförmige Eingangsströme und eine konstante Gleichspannung zu gewährleisten. Im Gegensatz dazu müssen einstufige Umrichtersysteme beide Anforderungen gleichzeitig erfüllen, während zweistufige Systeme eine konstante Ausgangsspannung trotz niederfrequenter Spannungsschwankungen im Gleichspannungzwischennetz gewährleisten können.

## 2.3 IAF Rectifier

Der IAF Gleichrichter wurde erstmals 1997 in [11] für den Einsatz in Photovoltaikanwendungen vorgestellt. Er besteht aus einem Diodengleichrichter für den Hauptleistungspfad. Um sinusförmige Ströme in allen drei Phasen einzuprägen, wird dieser durch ein Netzwerk aus bidirektional sperrenden Leistungshalbleitern mit einer Induktivität und einer Halbbrücke, der sogenannten THI-Schaltung, ergänzt. Durch die Integration des Filters in den Leistungspfad ist keine externe Blindleistungskompensation erforderlich und die Filter können kleiner dimensioniert werden. Aufgrund des ungesteuerten Diodengleichrichters ist jedoch eine nachträgliche Spannungsregelung durch einen Tiefsetzsteller erforderlich [14]. Das Netzwerk aus bidirektionalen Schaltern, auch IVS genannt, ermöglicht das Umschalten zwischen den einzelnen Phasen, in die durch die Induktivität und die Halbbrücke der gewünschte sinusförmige Stromverlauf eingeprägt wird. Dazu schaltet die Halbbrücke hinter der Induktivität entweder auf das positive oder auf das negative Potential der Zwischenkreisspannung ( $U_{pn}$ ). Da der Diodengleichrichter immer nur aus zwei Phasen Strom bezieht, prägt die Schaltung ohne Phasenverschiebung nur in die jeweils dritte Phase Strom ein. Der IVS schaltet mit Netzfrequenz und benötigt bidirektionale Schalter, um den Stromfluss während der gesamten Sinusperiode steuern zu können. Bei der Blindleistungsbereitstellung kommt es aufgrund der Phasenverschiebung zu einer Verschiebung zwischen Phasenstrom und Spannung. Dadurch ändert sich der Stromverlauf in der Drossel von einer Dreiecksfunktion ohne Blindleistung zu einer gekrümmten Funktion. Durch die Verschiebung muss ein größerer Strom zwischen den Halbleitern kommutieren.

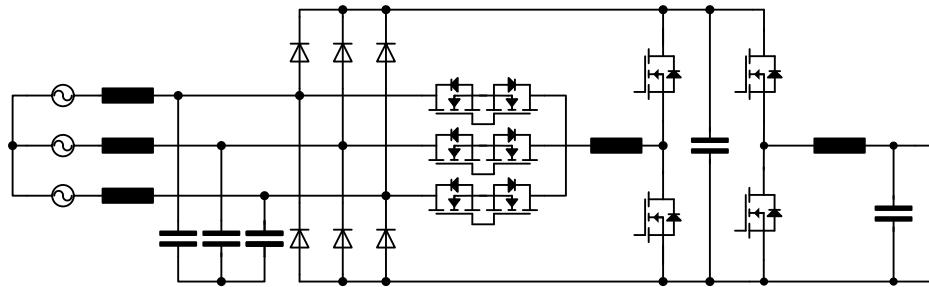


Abbildung 2.3-1: IAF Gleichrichter Topologie mit Tiefsetzsteller

## 2.4 1/3 PWM PFC Rectifier

Diese Topologie ist eine weit verbreitete B6-Topologie, die aus drei Halbbrücken besteht, die jeweils an eine Phase angeschlossen sind. Durch ein adaptives Modulationsverfahren unter Verwendung von Induktivitäten auf der Netzseite werden die Schaltverluste und SDL reduziert. Das Verfahren wurde von Menzi, Bortis und Kolar [8] ausführlich beschrieben. Zur Regelung der Ausgangsspannung wird ein entkoppelter Tiefsetzsteller verwendet.

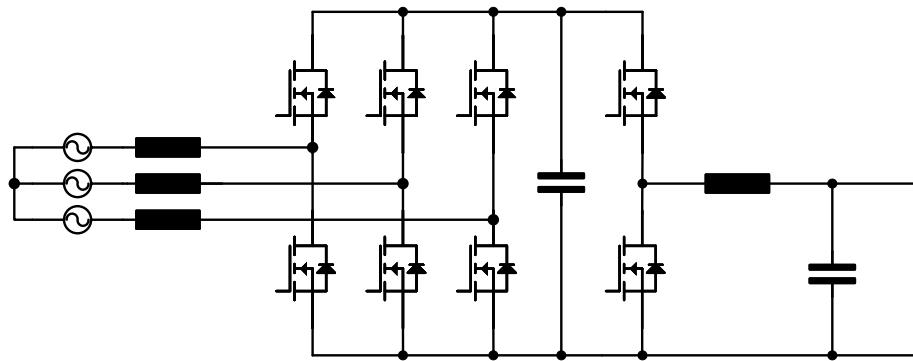


Abbildung 2.4-1: 1/3 PWM PFC Topologie mit Tiefsetzsteller

Die Besonderheit der Regelung besteht darin, dass die Phase, die gerade keinen Strom führt, weil sie die niedrigste Spannung hat, durch Pulsweiten Modulation (PWM) Ansteuerung der entsprechenden Halbbrücke einen entsprechenden Stromfluss erhält. Die beiden anderen Halbbrücken werden jeweils wie ein Diodengleichrichter geschaltet. Dieser Vorgang ist prinzipiell der gleiche wie beim IAF und kann daher zum besseren Verständnis gemeinsam betrachtet werden, siehe Abb. 2.4-2. Im hervorgehobenen Abschnitt ist die Phase b am niedrigsten und man sieht im Bereich (f), dass nur eine Halbbrücke durch PWM angesteuert wird. In Bereich (e) ist der Tastgrad D dargestellt, wobei der Wert 1 die permanente Verbindung mit dem positiven Potential und -1 die Verbindung mit dem negativen Potential des Zwischenkreises  $U_{pn}$  darstellt [8].

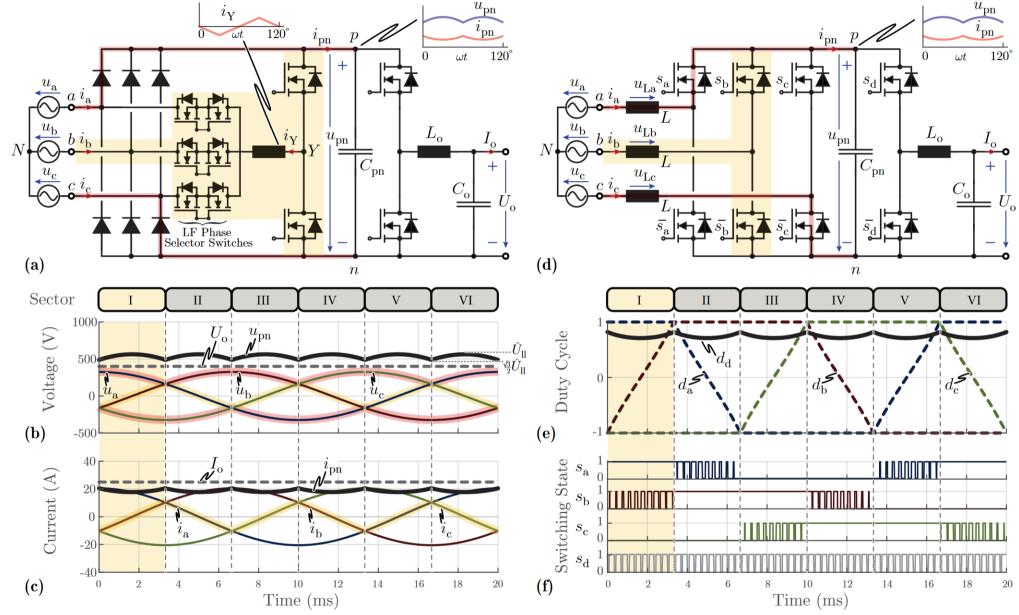


Abbildung 2.4-2: Sektorenaufteilung und Schaltverhalten von IAF und B6 1/3 [8]

## 2.5 Leistungshalbleiter

Halbleiter sind prinzipiell alle Bauelemente mit mindestens einem PN-Übergang; können sie größere Leistungen schalten, werden sie als Leistungshalbleiter bezeichnet. Dabei sind für die verwendete Topologie neben der klassischen Diode vor allem Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistors (MOSFET) relevant. Diese verdrängen derzeit in der Leistungselektronik häufig den verbreiteten IGBT aufgrund der preiswerter gewordenen Variante aus Siliziumkarbid [2]. Die Vorteile dieser neuen Technologie liegen in der Ermöglichung höherer Schaltfrequenzen, wodurch wiederum die in den induktiven Bauelementen zu speichernde Energie reduziert und somit Kosten eingespart werden können.

Zur Auswahl der am besten geeigneten Halbleiter werden unter anderem Schaltungssimulationen eingesetzt, diese erfordern eine Nachbildung der Halbleiter. Um die Modelle der Leistungshalbleiter zu erstellen und ggf. vorhandene Modelle zu validieren, können Messungen im Doppelpulstest (DPT) durchgeführt werden. Ein Beispiel für die in PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) (PLECS) dargestellten Ausschaltverluste eines Halbleiters zeigt Abb. 2.5-1. Es ist zu erkennen, dass die Punkte nur für den Betriebspunkt von 600 Volt zur Verfügung stehen, für andere Betriebsbereiche muss das Verhalten approximiert werden. Außerdem ist der Gatevorwiderstand ( $R_{GV}$ ) nur für einen begrenzten Bereich dargestellt und die Gate-Source-Spannung ( $U_{GS}$ ) nur auf einen Wert beschränkt. Dies kann in der späteren Anwendung zu deutlichen Abweichungen führen.

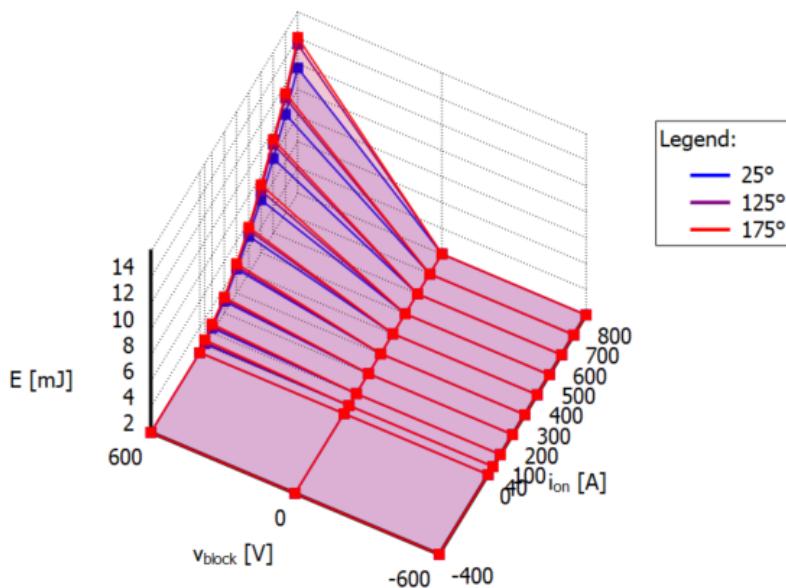


Abbildung 2.5-1: Darstellung der Ausschaltverluste [9]

## 2.6 Induktive Komponenten

Induktive Bauelemente sind in der Regel Spulen und Transformatoren, die zur Speicherung und Übertragung von Energie dienen. Transformatoren bieten zusätzlich die Möglichkeit der galvanischen Entkopplung von Stromkreisen. Für die Dimensionierung von Induktivitäten wird das Delta des Stromes in der Spule, der sogenannte Stromrippel, benötigt. Dieser Strom wird in der Regel mit 30 Prozent des Effektivstroms ausgelegt. Für Drehstromsysteme kann der Ripplestrom nach der Formel 2.6-1 ermittelt werden. Dabei sind Scheinleistung ( $S$ ) und Leiterleiterspannung ( $U_{LL}$ ) die Spannungen zwischen den Außenleitern. [3].

$$\Delta I = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot S}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{LL}} \quad (2.6-1)$$

Außerdem kann über die Gespeicherte Energie in der Spule ( $W_L$ ) eine Aussage über die Größe und damit indirekt über die Kosten und den Platzbedarf getroffen werden. Die Energie  $W_L$  kann mit der Formel 2.6-2 berechnet werden. Dazu wird der Wert der Induktivität und der Effektivwert des Stroms  $I_{RMS}$  benötigt [3].

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{RMS}^2 \quad (2.6-2)$$

## 2.7 Simulationssoftware

Um die Machbarkeit von Topologien bewerten und untersuchen zu können, ist es notwendig, diese in einer Gesamtsimulation zu betrachten. Dies ermöglicht es, die Funktionalität und den Einfluss der Parameter im direkten Zusammenspiel zu untersuchen. Insbesondere das Verhalten für Systemdienstleistungen, wie die Phasenverschiebung und die dadurch beeinflusste Verteilung der Verlustleistungen, soll als Entscheidungsgrundlage dienen.

### 2.7.1 PLECS

Die Software PLECS der Firma PLEXIM wird als Integration in MATLAB mit Simulink verwendet. Sie ermöglicht die Modellierung von Schaltungen unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens durch elektrische Verlustleistungsmodelle. Dazu wird die Energie im Schaltvorgang sowie im durchgeschalteten Zustand in der Schaltung berücksichtigt. Dies ermöglicht die Betrachtung der Verlustleistung innerhalb des Halbleiters und damit den Aufwand für die Kühlung und eine Abschätzung des Wirkungsgrades der Schaltung. Ein Beispiel der Funktionen ist in Abb. 2.7.1-1 zu sehen, die thermische Kette muss aus Datenblättern o.ä. der Kühlkörper bekannt sein. Für Halbleiter werden thermische Modelle benötigt, die ebenfalls aus Datenblättern erstellt oder vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden können. Allerdings gibt es nicht für alle Halbleiter ausreichende Informationen und die tatsächliche Verlustleistung hängt von vielen Parametern ab. Daher ist es oft notwendig, eigene Messungen durchzuführen, um die spätere Anwendung bestmöglich simulieren zu können.

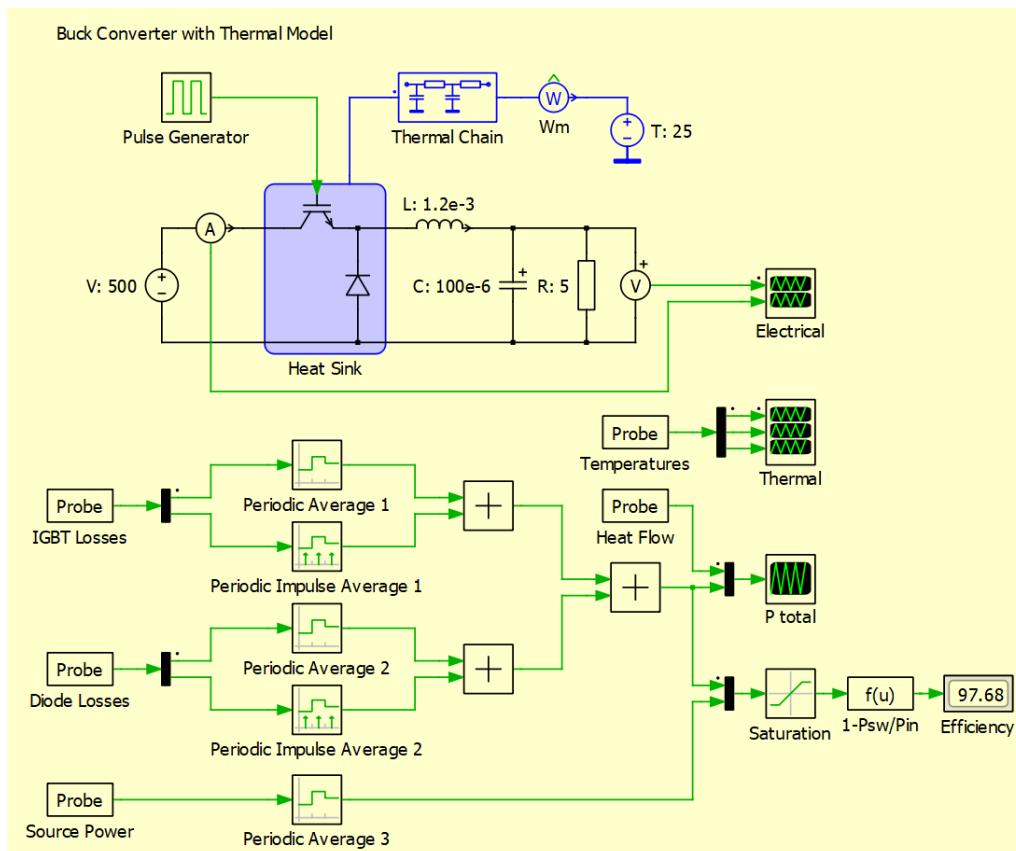


Abbildung 2.7.1-1: Tiefsetzsteller mit Effizienzbestimmung

## 3 Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den Elektrolyseur von beiden Seiten beschrieben. Auf der einen Seite fordert der Netzbetreiber u.a. die Einhaltung der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) Richtlinien für den Netzanschluss. Die andere Seite wird durch den Hersteller des Elektrolyseur-Stacks definiert, für den es nach heutigem Stand keine Normen gibt.

### 3.1 Stromnetz

In Deutschland sind die Anforderungen an den Netzanschluss von Anlagen durch die VDE festgelegt. Je nach Anschlussleistung, Standort und Betriebsverhalten wird eine unterschiedliche Netzspannungsklasse gewählt, die leicht abweichende Anschlussrichtlinien besitzt. Aufgrund der Skalierbarkeit zu höheren Leistungsklassen und den zu erwartenden steigenden Anforderungen wird die Hochspannungsklasse gewählt. Dies ist die VDE-AR-N 4120 "Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)" [19]. Dies beinhaltet u.a. die Anforderung an die Phasenverschiebung, bei Wirkleistungsbezug darf eine maximale Verschiebung von  $\cos(\phi) = 0,95$  auftreten, was einem Winkel von ca. 18 Grad entspricht, vgl. Abbildung 3.1-1. Der Netzbetreiber kann jedoch mit dem Anlagenbetreiber gesonderte Vereinbarungen treffen, die es ermöglichen, Netzdienstleistungen anzubieten. Daraus ergibt sich die Anforderung an die Topologie, eine Phasenverschiebung von mindestens 18 Grad zu ermöglichen.

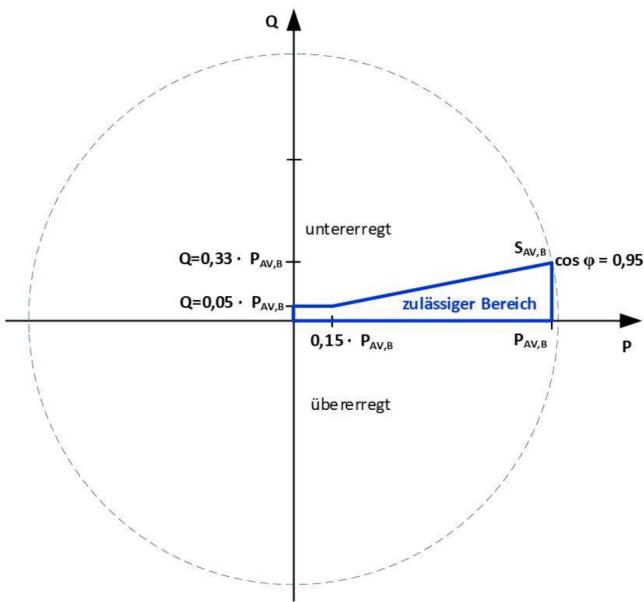
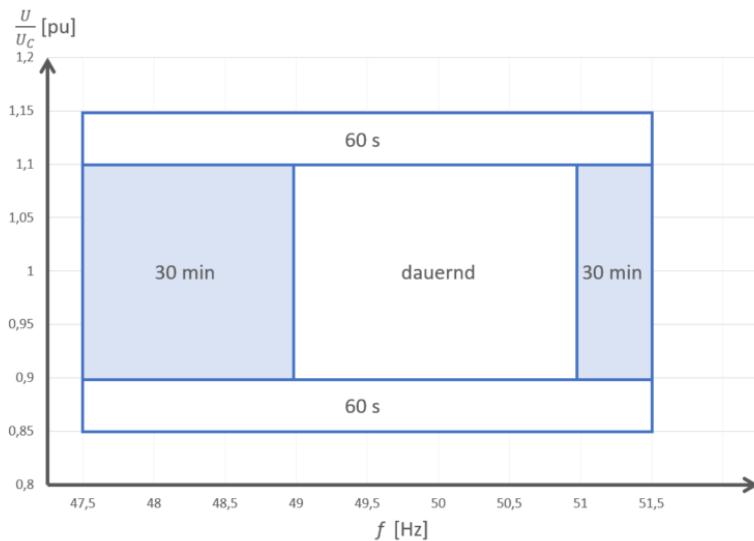
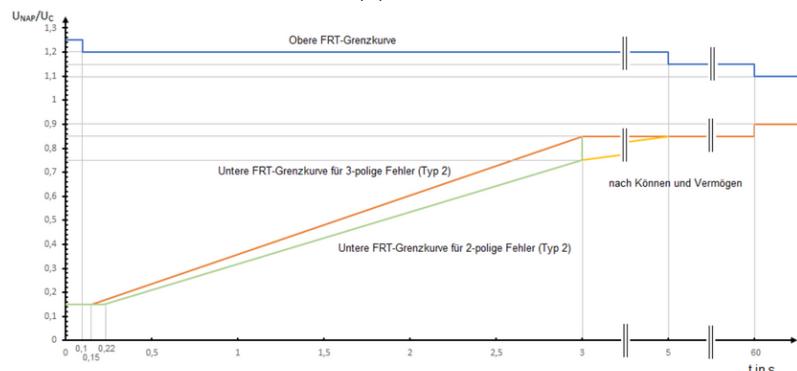


Abbildung 3.1-1: VDE TAR4120: Zulässiger Bereich des Verschiebungsfaktors [19]

Als quasistationärer Betrieb werden auch zeitlich begrenzte Frequenz- und Spannungsänderungen definiert, die auftreten können. Die Netzspannung darf im Bereich von +/- 15 Prozent schwanken, die Frequenz von 50 Hertz zwischen 47,5 und 51,5 vgl. Abb. 3.1-2 (a). Innerhalb dieses Bandes muss die Anlage im Regelbetrieb bleiben. Dies setzt einen Gradienten von <5 % im Spannungsband und <0,5 % pro Minute im Frequenzband voraus. Im Fehlerfall durch Blitzschlag oder Kurzschluss muss die Anlage kurzzeitig deutlich größere Spannungsschwankungen ertragen. Diese Anforderung wird als FRT bezeichnet und kann die Spannung für bis zu 100 Millisekunden um 25 Prozent erhöhen, siehe Abbildung 3.1-2 (b). Durch einen Kurzschluss kann die Spannung auf 15 Prozent der eigentlichen Netzspannung absinken. Dies stellt für Verbraucheranlagen eine große Herausforderung dar, da die zu betreibenden Systeme in der Regel eine Mindestspannung benötigen.



(a)



(b)

**Abbildung 3.1-2:** Mindestanforderungen an den quasistationären Betrieb (a) und FRT (b)

### 3.1.1 Systemdienstleistungen (SDL)

Generell ist die Bundesnetzagentur für die Regulierung und Überwachung aller Dienstleistungen und Aktivitäten im deutschen Netz zuständig. Dazu gehört auch die Bereitstellung und Sicherstellung von Blindleistung neben der Wirkleistung, die effizient, transparent

und diskriminierungsfrei am Markt zu beschaffen ist. Hierfür bieten sich zukünftig große Verbrauchseinrichtungen wie Elektrolyseure neben Erzeugungsanlagen an und diese Dienstleistungen können die Wasserstofferzeugung wirtschaftlicher machen.

Die Systemdienstleistungen werden nach VDE-ARN 4141-1 in vier Kategorien unterteilt: Frequenz- und Spannungshaltung, Netzwiederaufbau und Betriebsführung. Die Technische Anschlussregeln (TAR) definiert diese und stellt Anforderungen an den Nachweis und die Ausschreibung von SDL. Eine Übersicht über die technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen in den verschiedenen Spannungsklassen zeigt Abb. 3.1.1-1. Frequenzschwankungen stellen für stromrichterbasierte Elektrolyseanlagen kaum eine Herausforderung dar, diese können durch Regelvorgänge kompensiert und Netzstützung, wie bei rate of change of frequency (RoCoF) erforderlich, bereitgestellt werden. Bei RoCoF handelt es sich um schnelle Frequenzänderungen, wie sie bei einer Netztrennung oder -wiederverbindung auftreten. Primärregelleistung, statische Spannungshaltung und dynamische Netzstützung können ebenfalls durch Regelverhalten realisiert werden, jedoch begrenzt durch die Dynamik und den Leistungsbezug des Elektrolyseurs. Netzrückwirkungen sind ebenfalls zu berücksichtigen und können durch entsprechende Filter kompensiert werden. Die Schwarzstartfähigkeit ist in diesem Fall schwierig und kann nur durch eine Leistungsbegrenzung während des Wiederaufbaus unterstützt werden.

Technische Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen (Stand 2019)				NEU
	NS	MS	HS	HöS
Unterfrequenz	✓	✓	✓	✓
Überfrequenz	✓	✓	✓	✓
Momentanreserve	✗	✗	✗	✗
RoCoF	✓	✓	✓	✓
Primärregelleistung	✗	✗	✓	✓
Statische Spannungshaltung	✓	✓	✓	✓
Dynamische Netzstützung	✓	✓	✓	✓
Netzrückwirkungen	✓	✓	✓	✓
Schwarzstartfähigkeit	✗	✗	(✓)	(✓)

Abbildung 3.1.1-1: Technischen Mindestanforderungen an Erzeugungsanlagen Stand 2019 [4]

### 3.1.2 Fault-Ride-Through (FRT))

Aufgrund von Netzfehlern oder Blitzeinschlägen kann es zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Netzspannung kommen, die als Überspannung bezeichnet wird. Diese Spannungserhöhung kann zu Fehlfunktionen bis hin zur Zerstörung von Anlagenteilen führen. Um die Anlage innerhalb der Norm betreiben zu können, müssen Schutzmaßnahmen getroffen werden, die einen Ausfall der Anlage und den Schutz der nachgeschalteten Komponenten gewährleisten.

Insbesondere bei Spannungseinbrüchen ist es wichtig, dass der Wirkleistungsbezug nach dem Fehler möglichst schnell wieder auf das Niveau vor dem Fehler zurückkehrt, falls diese

reduziert wurde. Dies wird von den vier in Deutschland zuständigen Übertragungsnetzbetreibern gefordert [1].

## 3.2 Elektrolyseur

Für die Elektrolyse wird eine Gleichspannung benötigt, die aufgrund von Alterungsprozessen in der Zellmembran mit der Zeit ansteigt [7]. Außerdem wird zu Beginn der Elektrolyse eine niedrige Spannung benötigt, um den Prozess zu starten. Daher ist ein Bereich von 0 bis zu einigen 100 Volt erforderlich. Um die gewünschte Leistung umsetzen zu können, ist es für die Wirtschaftlichkeit relevant, den Strom so weit wie möglich zu reduzieren, was eine höhere Spannung zur Folge hat. Dies wird durch den modularen Zellaufbau unterstützt, der eine flexible Systemspannung ermöglicht.

Um den Wirkungsgrad und die Lebensdauer des Elektrolyseurs nicht zu verringern, wird ein maximaler Stromrippel vorgegeben. Dieser liegt für Anlagen bis drei Megawatt zwischen fünf und zehn Prozent, für größere Leistungen und zukünftige Anwendungen soll er unter drei Prozent liegen [20].

## 3.3 Zusammenfassung

Die Anforderungen an den Gleichrichter sind in Tabelle 3.3-1 zusammengefasst, für die Umsetzung sind die Zukünftigen Anforderungen relevant.

**Tabelle 3.3-1:** Anforderungen an den Gleichrichter Aktuell und in Zukunft

	Aktuell	Zukünftig
Leistungsfaktor stationär	>0.95	>0.99
Leistungsfaktor als Systemdienstleistung	keine Angabe	+/- 30°
Ausgangstromrippel	<5 %	<2 %
Ausgangsspannung	< 1000 V	< 1500 V

## 3.4 Bewertungskriterien

Die Kriterien für die endgültige Auswahl der Topologie setzen sich aus der Erfüllung der Anforderungen und der Bewertung der Hardware zusammen. Die grundsätzlichen Anforderungen von Seiten des Stromnetzes und des Elektrolyseurs wurden bereits in der Vorauswahl berücksichtigt und können nun im Detail anhand von Total Harmonic Distortion (THD) und Ripplegrößen betrachtet werden. Die Quantifizierung der Hardware erfolgt zum einen über die Verlustleistung in den Halbleitern, die indirekt auch den Kühlungsaufwand abbildet, zum anderen über die Größe und den Aufwand der Komponenten.

# 4 Vorauswahl

Um die möglichen Optionen einzugrenzen wird im folgenden eine Auflistung der Topologien erstellt und anhand einfacher Kriterien die Auswahl eingegrenzt. Einen guten Überblick über Schaltungen für Dreiphasige Gleichrichter mit Leistungsfaktorkorrektur gibt die Präsentation von Dominik Bortis et al. [5]. Diese bezieht sich auf Systeme mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur. Aufgrund gewünschter Systemdienstleistungen, wie Blindleistungsbereitstellung sind Systeme mit Hybrider Kompensation nicht ausreichend.

## 4.1 Mögliche Topologien

Die Grundlegende Topologie welche zur Vollständigkeit aufgelistet wird, ist der dreiphasige Diodengleichrichter, welcher bereits in Abschnitt 2.2.1 dargestellt wurde. Die weiteren Topologien werden im folgenden aufgelistet.

### 4.1.1 6-Switch Boost PFC Rectifier

Bei der ersten Topologie wurde prinzipiell beim Diodengleichrichter, die Dioden durch Schalter ersetzt, siehe Abbildung 4.1.1-1. Dies ermöglicht im Zusammenspiel mit den Eingangsimpedanzen ein Hochstellendes Verhalten und Modulation der Eingangsströme über verschiedene PWM Verfahren zum gewünschten Sinusförmigen Eingangsstrom.

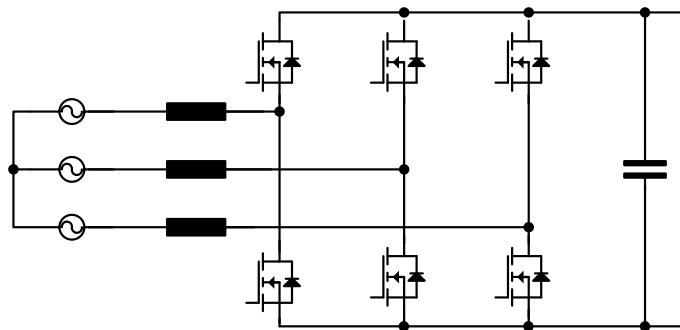
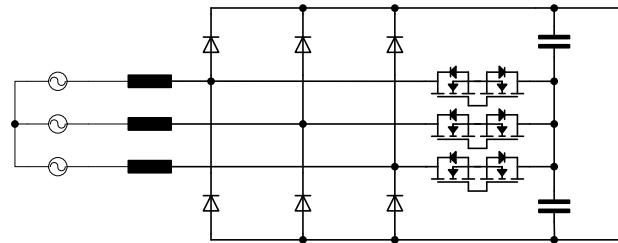


Abbildung 4.1.1-1: Six Switch Boost PFC Rectifier

### 4.1.2 Vienna Rectifier

Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine Hochstellende Topologie. Diese besteht aus einem Diodengleichrichter mit Eingangsinduktivitäten und wird ergänzt durch einen IVS an welchen Kapazitäten zur Ausgangsspannung geschaltet werden können. Siehe Abbildung 4.1.2-1. Durch diese 3-Level Struktur, kann eine bessere Form des Eingangsstroms erreicht

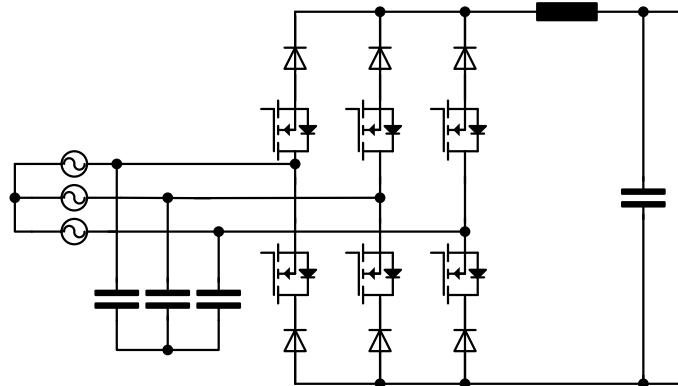
werden, als bei der 2-Level 6-Switch Boost PFC Topologie. Außerdem kann aus selbem Grund die Induktivität kleiner ausfallen.



**Abbildung 4.1.2-1:** Vienna Rectifier

### 4.1.3 6-Switch Buck PFC Rectifier

Durch verschieben der Drossel auf die Ausgangsseite entsteht aus dem 6-Switch Boost eine Tiefstellende Topologie. Jedoch wird sperrendes Verhalten in beide Richtungen benötigt, um die Ausgangsspannung und den Eingangsstrom in die gewünschte Form zu bringen. Daher werden die Schalter durch Dioden ergänzt, wie in Abbildung 4.1.3-1 dargestellt.



**Abbildung 4.1.3-1:** Six Switch Buck PFC Rectifier

### 4.1.4 Swiss Rectifier

Bei dieser Topologie handelt es sich um die Integration des Tiefsetzstellers in die Schaltung des IAF. Dazu wird die Induktivität im IVS Pfad mit der des Tiefsetzstellers kombiniert und der Schalter des Tiefsetzstellers kann durch eine Diode ersetzt werden. Die Schaltung kann in Abbildung 4.1.4-1 gefunden werden und der IAF wurde in Abbildung 2.3-1 bereits dargestellt. Durch die Einsparung des Schalters kann die Effizienz gesteigert werden.

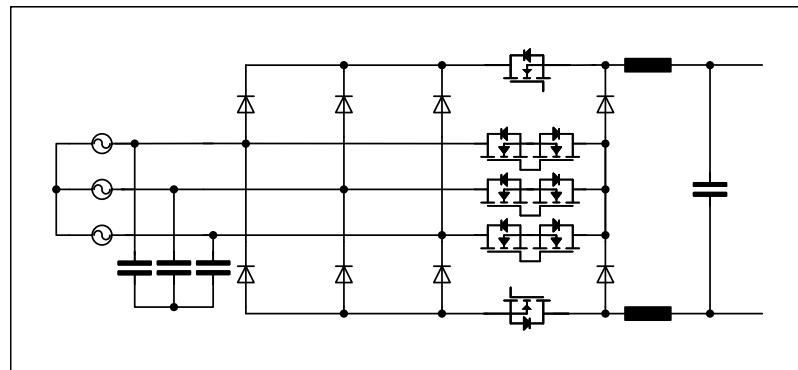


Abbildung 4.1.4-1: Swiss Rectifier

#### 4.1.5 2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier

Um einen breiteren Ausgangsspannungsbereich erzielen zu können wird der 6-Switch Buck durch einen Hochsetzsteller am Ausgang ergänzt. Dies ist in Abbildung 4.1.5-1 dargestellt.

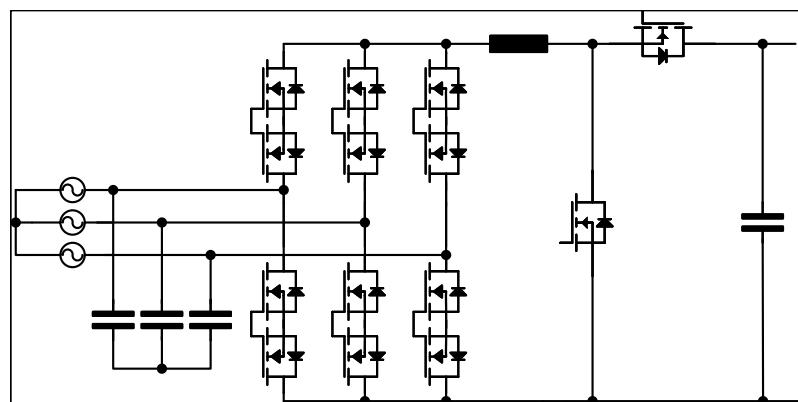


Abbildung 4.1.5-1: 2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier

#### 4.1.6 Trident Rectifier

Diese Topologie stammt vom 6-Switch Boost Rectifier ab, wobei an jeder Phasenhalbbrücke ein eigener Tiefsetzsteller angeschlossen wird. Somit besitzt jede Phase einen unabhängigen identischen Parallelbau zwischen AC und DC Pfad, siehe Abbildung 4.1.6-1.

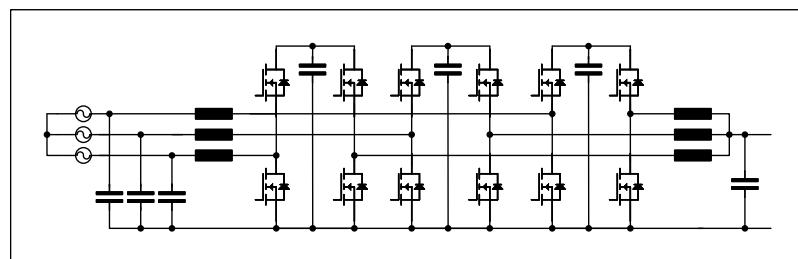


Abbildung 4.1.6-1: Trident Rectifier

#### 4.1.7 Y-Rectifier

Anstelle der Hoch- und Tiefstellenden Topologie wird hier umgekehrt Tief- und Hochgesetzt, dazu werden zwölf Halbleiterschalter genutzt. Es wird nur eine dreiphasige Drossel benötigt, welche zwischen den beiden Stellgliedern sitzt. Die Schaltung ist in Abbildung 4.1.7-1 dargestellt.

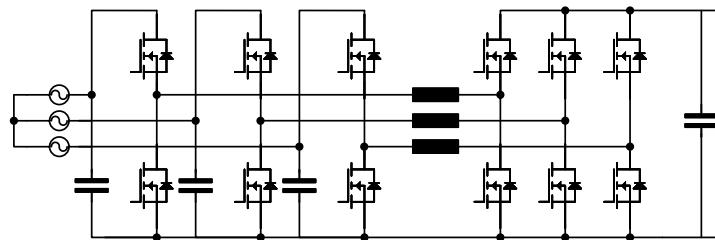


Abbildung 4.1.7-1: Y Rectifier

#### 4.2 Auswahl der Topologien

Zur Eingrenzung des Lösungsraums wird zunächst eine Auflistung der möglichen Schaltungstopologien zum Anschluss an das dreiphasige Stromnetz erstellt, vgl. Tabelle 4.2-1. Die 15 aufgelisteten Topologien, begonnen mit dem in Abb. 2.2.1-1 dargestellten Diodengleichrichter, werden anhand der benötigten Induktivitäten, Dioden, Schaltern und Stufen, sowie der Funktionsweise Hoch- bzw. Tiefstellend bewertet.

Tabelle 4.2-1 zeigt, dass sich für eine engere Betrachtung die vier in grün hervorgehobenen Topologien eignen, da diese die im Vergleich wenigstens Induktivitäten und Halbleiter benötigen. Diolen sind aufgrund ihres simpleren Aufbaus günstiger als Leistungsschalter und fallen daher nicht so stark ins Gewicht. Die beiden anderen Topologien, 6-Switch Buck und Swiss Rectifier, werden in einer anderen Arbeit betrachtet.

Aufgrund der Komplexität der Schaltungen und benötigten Regelungen werden in dieser Arbeit der IAF und 1/3-PWM-PFC betrachtet und die Ergebnisse für eine finale Bewertung aufbereitet.

**Tabelle 4.2-1:** Topologievergleich zur Vorauswahl

	Induktivitäten	Dioden	Schalter	Buck/Boost	Stufen
3-ΦDiode Bridge Rectifier	3	6	0	-	1
6-Switch Boost PFC Rectifier	3	0	6	Boost	1
Vienna Rectifier	3	6	6	Boost	1
6-Switch Buck PFC Rectifier	1	6	6	Buck	1
IAF	2	6	10	Buck	2
Swiss Rectifier	1	8	8	Buck	2
1/3-PWM-PFC	4	0	8	Boost/Buck	2
2/3 PWM Buck & Boost Current Source Rectifier	1	0	14	Buck/Boost	2
Trident Rectifier	6	0	12	Buck/Boost	2
Y-Rectifier	3	0	12	Buck/Boost	2
3-Level Neutral Point Clamped	3	6	12	Boost	1
3-Level Active Neutral Point Clamped	3	0	18	Boost	1
3-Level Active Neutral Point Clamped + Tiefsetzsteller	4	0	20	Boost/Buck	2
Three-Level Flying Capacitor (FC) Boost-Type Rectifier System	3	0	12	Boost	1
Three-Level Flying Capacitor (FC + Tiefsetzsteller)	4	0	14	Boost/Buck	2

## 5 Simulation

Die Simulationen werden vom Grundaufbau wie folgt umgesetzt, sie bestehen aus einem Konfigurationsskript, welches die Parameter für das eigentliche Modell in den Matlab Workspace lädt und die Automatisierung der Simulationsdurchläufe umsetzt. Das Modell wird in Simulink über PLECS Blockset aufgebaut und durch einen Output als gebündelte Schnittstelle werden die Daten an Matlab zurückgeführt. Die Rückführung der Daten wird für die Simulationen einheitlich in festgelegter Reihenfolge zusammengeführt, siehe Abb. 5-2. Dies ermöglicht eine einheitliche Auswertung der Daten und sie können einheitlich abgespeichert werden, um die Datenmenge zu begrenzen wird die Anzahl der Messpunkte auf die letzte Sinusperiode begrenzt. Die Schaltung und zugehörige Regelung befindet sich in jeweils eigenen PLECS-Systemen, außerdem wird für das Netz und den Elektrolyseur ein eigenes Subsystem vorgesehen, siehe Abb. 5-1.

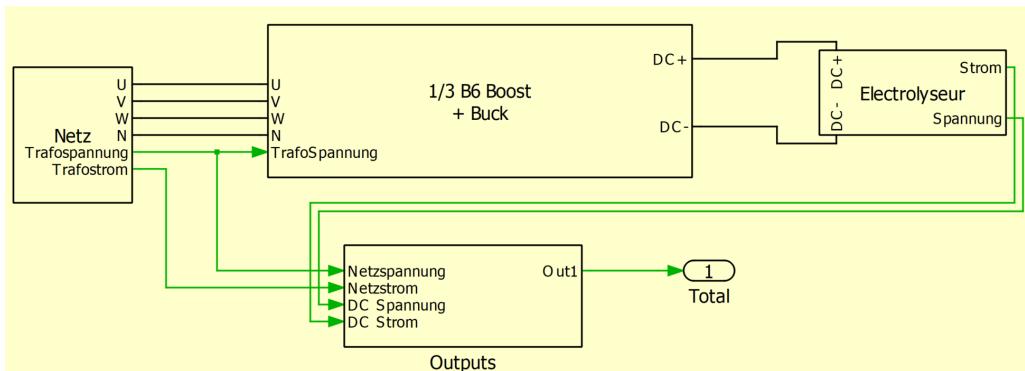


Abbildung 5-1: Übersicht der PLECS Simulation

Das Netz wird durch eine einfache Drehstromquelle dargestellt und kann in späteren schritten durch Netzimpedanzen und Fehlerszenarien ergänzt werden. Der Elektrolyseur besteht zur Vereinfachung aus einem passenden Lastwiderstand, der die entsprechend dem Skript eingestellte Leistung im Betriebspunkt abruft. Außerdem werden einige Widerstände eingesetzt, um PLECS die Berechnung zu ermöglichen, da sonst im Einschaltvorgang durch Kapazitäten unendlich hohe Ströme entstehen würden und im realen Aufbau immer parasitäre Widerstände vorhanden sind.

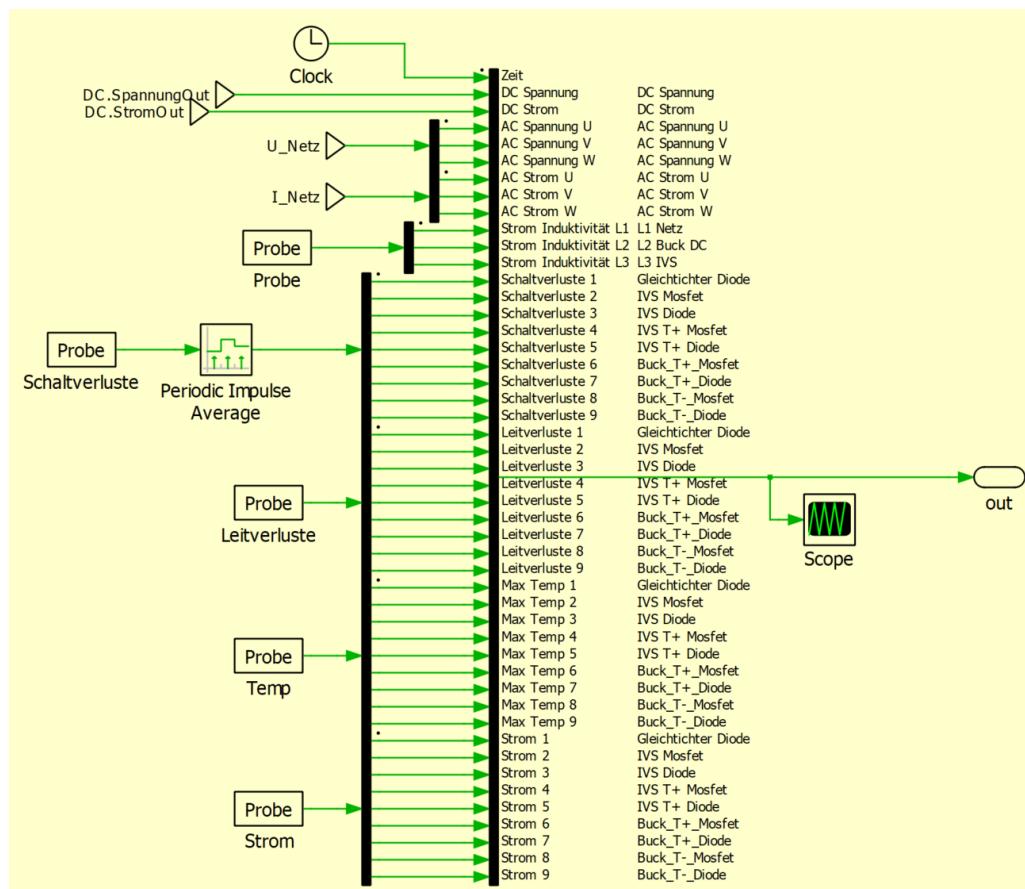


Abbildung 5-2: Zusammenfassung der Simulationsoutputs

## 5.1 Randbedingungen

Für den Gleichrichter werden Grundlegende Parameter festgelegt um die Auslegung für die Simulation durchführen zu können. Die Spannungsschwankung am Eingang wird auf 10 % begrenzt, dies kann durch Varistoren oder ähnliches in der späteren Anwendung sichergestellt werden.

- Ausgangsleistung: 200 kW
- Ausgangsspannung: 482-680 V
- Ausgangsstrom: 295 A
- $U_{LL}$ : 617 V
- Netzfrequenz 50 Hz
- Filterblindleistung: 3 %
- Schaltfrequenz: 20 kHz
- Netzspannungsschwankung: 10 %

Die Regelungen werden in den Simulationen nur im ein geschwungenen Zustand betrachtet, da dies für den Vergleich in festen Betriebspunkten ausreicht. Dies erleichtert die Auslegung der Regler, die Parameter werden so gewählt, dass ein stabiler Zustand erreicht wird und keine Oszillationen oder ähnliches Auftreten. Außerdem wird für die Bewertung die letzte Periode der Simulation verwendet, dieser Abschnitt wird zur späteren Betrachtung gespeichert.

## 5.2 Tiefsetzsteller

Der Tiefsetzsteller kann in den beiden Schaltungen entkoppelt betrachtet werden, für die Auslegung der Induktivität ist dies von Vorteil. Die Reglung kann ebenso entkoppelt erfolgen und ermöglicht somit eine getrennte Stabilitätsbetrachtung und Optimierung.

### 5.2.1 Auslegung der Induktivität

Die Speicherdiode wird anhand von Formel 2.2.2-1 ausgelegt, dabei liegt die Netzspannung bei maximal  $U_{LLmaxPeak} = 1,1 \cdot 617V \cdot \sqrt{2} = 959,8V$  und die Ausgangsspannung bei mindestens 482 V. Daraus ergeben sich die maximalen Parameter, die der Tiefsetzsteller umsetzen muss. Es ergibt sich somit eine Induktivität von 134,16 µH, siehe Formel 5.2.1-1. Die Energie beträgt 7,78 Joule, bei einem Ausgangsstrom von 294 A.

$$L_T = \frac{959,8V - 482V}{20\text{kHz} \cdot 0,3 \cdot 294A} \cdot \frac{482V}{969,8V} = 134,16\mu\text{H} \quad (5.2.1-1)$$

$$E = 0,5 \cdot L_T \cdot I^2 = 7,78J \quad (5.2.1-2)$$

### 5.2.2 Regelung

Die Regelung lässt sich anhand der in Abschnitt 2.2.2 beschrieben Zusammenhänge der Eingangsspannung auslegen, der Dutycycle D ist das Verhältnis aus Eingangs- und Ausgangsspannung. Aufgrund der sechspulsigen Zwischenkreisspannung schwankt der Dutycycle D leicht aber da eine feste Ausgangsspannung gewünscht ist, lässt sich die Regelung durch einen PI-Regler implementieren.

## 5.3 IAF

Der Hauptteil der Simulation liegt in den Leistungshalbleitern, deren Anordnung kann in Abb. 5.3-1 und 5.3-2 gefunden werden. Für die Verlustleistungsbestimmung werden Modelle von Infineon verwendet, für die Dioden und den IVS wird ein gemeinsames Modul vorgesehen mit  $5 \text{ m}\Omega$  Silicon-Carbide (SiC) MOSFET. Die Halbbrücke an der Induktivität wird aus einem Modul mit einem Nominalstrom von 45 A umgesetzt. Alle Halbleiter haben eine Spannungsfestigkeit von 1200 V.

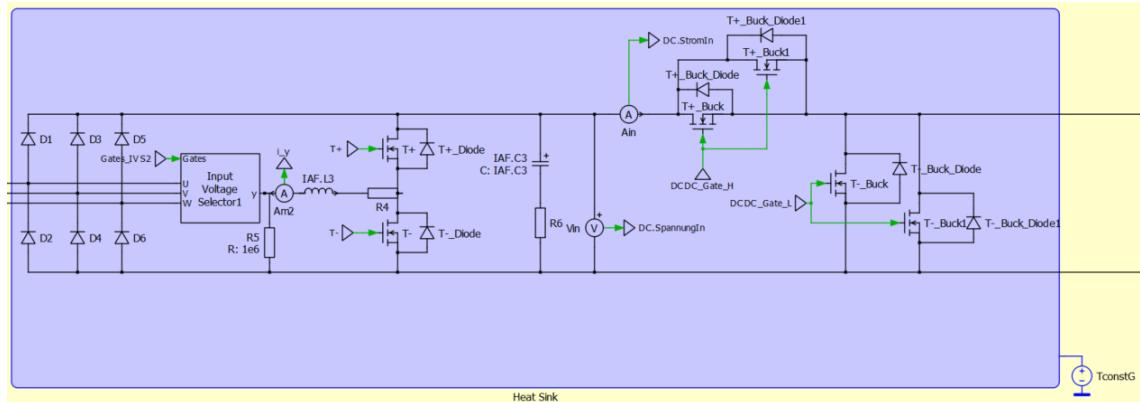


Abbildung 5.3-1: Simulationsaufbau der Halbleiter des IAF

### 5.3.1 Auslegung der Induktivitäten

Der maximale Stromrippel ergibt sich aus der Leistung und der minimalen Netzspannung und beträgt 44,1 A, siehe Formel 5.3.1-1. Der Rippelstrom wird wieder auf 30% des Nominalstroms ausgelegt. Somit muss die Induktivität einen Wert von  $272\mu\text{H}$  besitzen, siehe Formel 5.3.1-2.

$$I_{\Delta maxIVS} = \frac{0,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 200\text{kW}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 617\text{V} \cdot 0,9} = 44,1\text{A} \quad (5.3.1-1)$$

$$L_{IVS} = \frac{U_{LLmaxPeak}}{4 \cdot f \cdot I_{\Delta maxIVS}} = 272\mu\text{H} \quad (5.3.1-2)$$

Bei der Betrachtung der Energie muss berücksichtigt werden, dass der Strom in der Drossel bei Blindleistung steigt und somit die Energie im quadratischen Verhältnis steigt. Der Strom bei einer Phasenverschiebung von 30 Grad wird über den Faktor  $\sin(30) = 0,5$

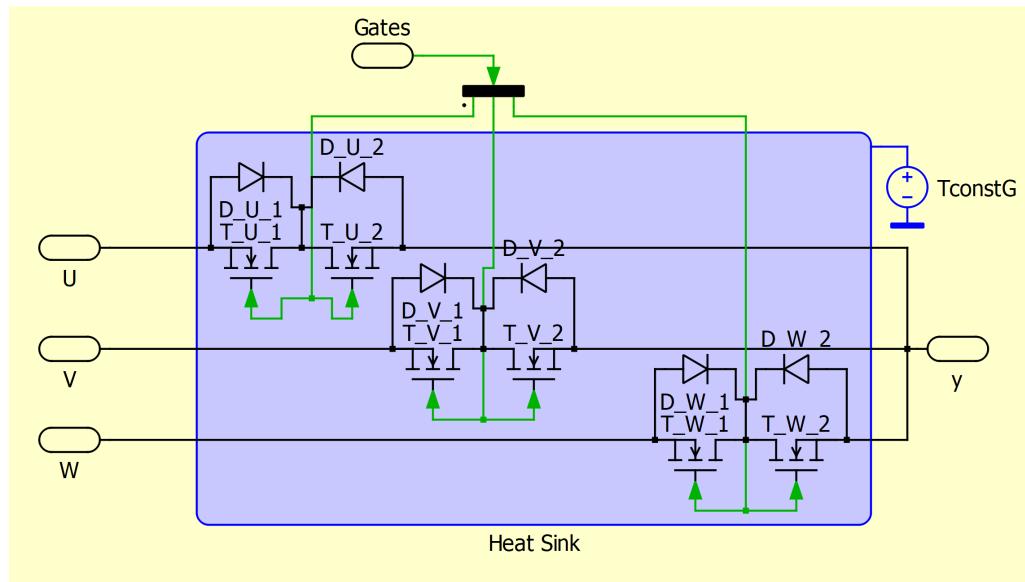


Abbildung 5.3-2: Simulationsaufbau der Halbleiter des IVS vom IAF

berechnet und ergibt sich somit zu 132,33 A, siehe Formel 5.3.1-3.

$$I_{IAF30^\circ} = \frac{0,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 200\text{kW}}{\sqrt{3} \cdot 617\text{V}} = 132,33\text{A} \quad (5.3.1-3)$$

Die Energie in der Drossel und damit relevante Größe für die Bewertung beträgt 2,38 Joule, siehe Formel 5.3.1-4.

$$E_{IVS} = 0,5 \cdot L_{IVS} \cdot I_{\Delta maxIVS}^2 = 2,38\text{J} \quad (5.3.1-4)$$

Außerdem wird eingangsseitig eine Filterinduktivität mit dem Wert 1 µH eingesetzt, diese hat eine gespeicherte Energie von 0,1 Joule, siehe Formel 5.3.1-5. Aufgrund der Dreiphasigen Anwendung, wird der Wert direkt mit dem Faktor drei multipliziert.

$$E_{L_{IAFAC}} = 3 \cdot 0,5 \cdot 1\mu\text{H} \cdot (260\text{A})^2 = 0,1\text{J} \quad (5.3.1-5)$$

### 5.3.2 Regelung

Der Tiefsetzsteller wird durch einen PI Regler für die Fehlerkorrektur angesteuert, der ideale Tastgrad wird anhand der gewünschten Ausgangsspannung, welche über den Sollstrom und bekannten Lastwiderstand generiert wird, und der Zwischenkreisspannung  $U_{pn}$  bestimmt. Der Tastgrad wird dann in einen PWM-Generator gegeben, welcher das Signal mit der gewünschten Schaltfrequenz von 20 kHz generiert. Um die Schaltverluste und insbesondere Leitverluste beim kommutieren in den Dioden zu berücksichtigen wird eine Totzeit von 500 ns eingestellt, vgl. Abb. 5.3.2-1.

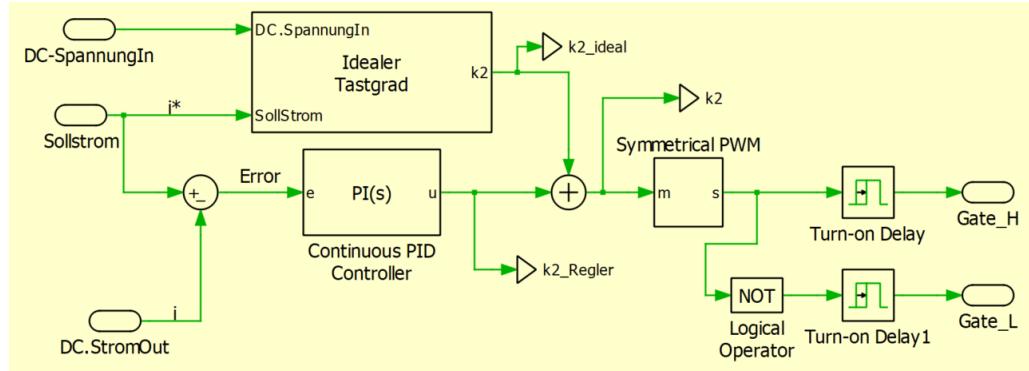


Abbildung 5.3.2-1: Regelung des Tiefsetzstellers des IAF

Die Regelung des IVS Stroms wird anhand der Struktur von Soeiro et al. umgesetzt, siehe Abb. 5.3.2-2 [16].

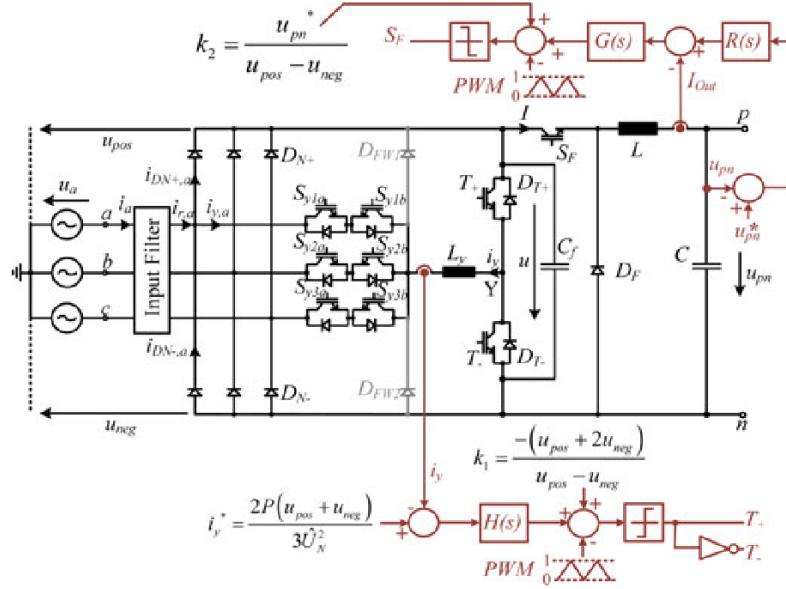


Abbildung 5.3.2-2: Struktur der Regelung des IAF [16]

Die Umschaltung zwischen den Phasen wird über eine von PLECS vorhandene Phase Locked Loop (PLL) zur Winkelbestimmung und anschließende Sektorbestimmung anhand des Winkels umgesetzt. Die Auswahl der entsprechenden Schalter wird über ein C-Skript implementiert, siehe Abb. 5.3.2-3.

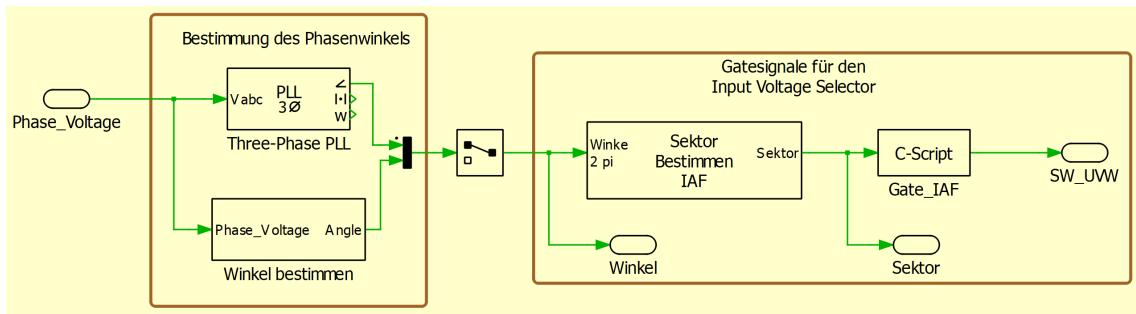


Abbildung 5.3.2-3: PLECS Aufbau der IVS Ansteuerung

Der ideale Tastgrad  $K_1$  für den Strom in der Drossel, wird über das Verhältnis der Spannungen durch den formelmäßigen Zusammenhang in Gleichung 5.3.2-1 bestimmt.

$$K_1 = \frac{U_{mid} - U_{low}}{U_{high} - U_{low}} \quad (5.3.2-1)$$

Der gewünschte Strom in der Drossel wird über den aktuellen Phasenwinkel der Spannung, welcher in der Ansteuerung des IVS durch die PLL erfasst wird und mit einer einstellbaren Phasenverschiebung verändert werden kann erzeugt. Dazu wird die Stromamplitude über die Netzspannung und gewünschte Ausgangsleistung bestimmt, siehe Formel 5.3.2-2. Der Strom wird über die Amplitude und den entsprechenden Winkel erzeugt und über die Sektorenzuweisung wird die mittlere Phase ausgewählt, siehe Abb. 5.3.2-4

$$\hat{I} = \frac{\text{sqrt}2P}{\sqrt{3}\cos(\varphi)U_{LLrms}} \quad (5.3.2-2)$$

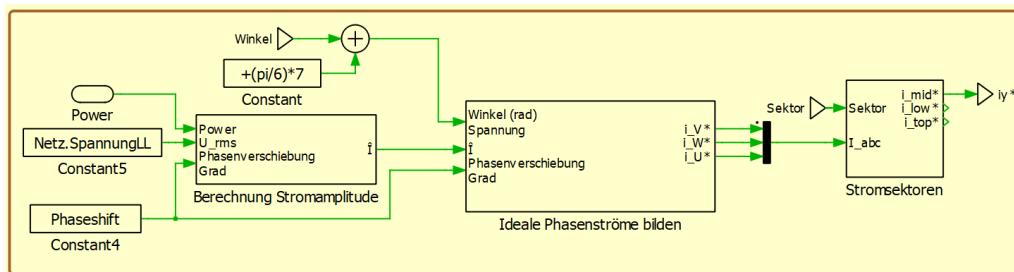


Abbildung 5.3.2-4: Bestimmung des Sollstroms der mittleren Phase

Die Regelung des Stroms wird über einen diskreten PI Regler Block aus der PLECS Bibliothek implementiert. Die Signale zur Gateansteuerung werden über einen PWM Generator erzeugt und anschließend zur Totzeit Implementierung durch eine Einschaltverzögerung verzögert. Dieser Aufbau kann in Abb. 5.3.2-5.

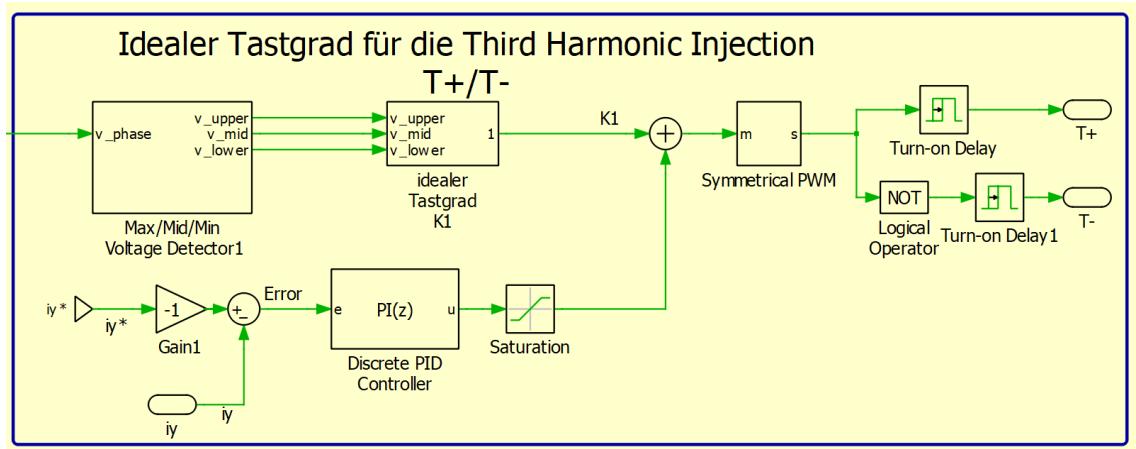


Abbildung 5.3.2-5: Regelung des Stroms in der mittleren Phase

## 5.4 B6 1/3 PFC Buck

Die in Kapitel 2.4 dargestellte Schaltung wird durch Halbbrücken Module des Typs FF2MR12W3M1H\_B11 von Infineon implementiert, siehe Abb. 5.4-1. Dabei handelt es sich um verbreitete 1200 V Module, sie besitzen einen nominellen Einschaltwiderstand von  $2 \text{ m}\Omega$  und können Spitzenströme von bis zu 800 A schalten [9].

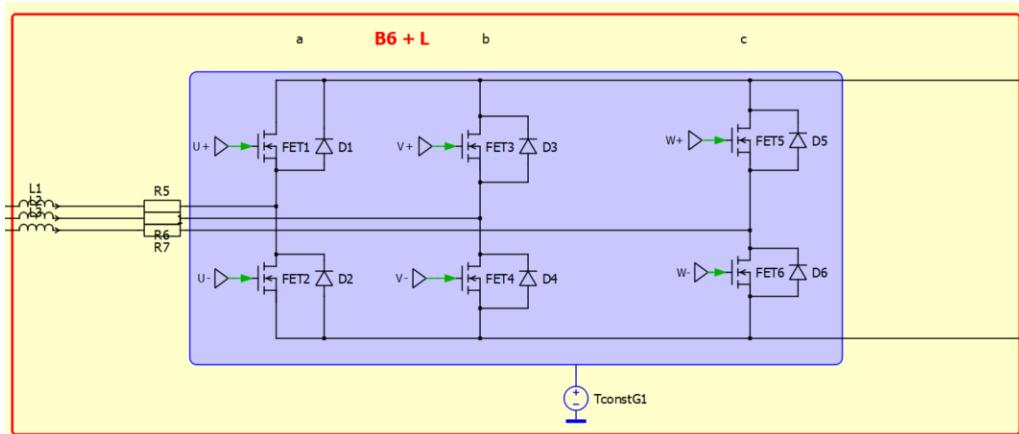


Abbildung 5.4-1: PLECS Aufbau der B6 Leistungshalbleiter

Um die Ausgangsleistung auch bei geringerer Spannung bereitstellen zu können und ein späteres Interleaving zu ermöglichen werden für den Tiefsetzsteller zwei Halbbrücken vorgesehen. Die Schaltung kann in Abb. 5.4-2 gefunden werden, es ist direkt zu erkennen, dass der Tiefsetzsteller durch die Kondensatoren am Eingang entkoppelt von der B6 Struktur ist.

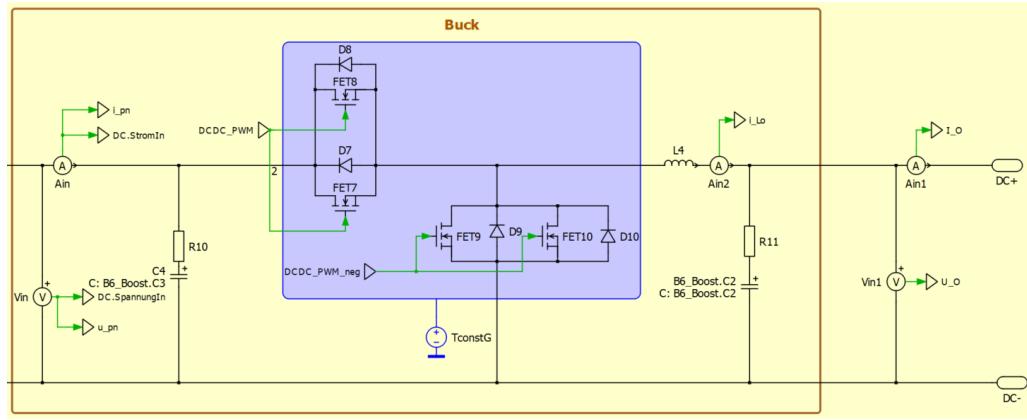


Abbildung 5.4-2: PLECS Aufbau des Tiefsetzstellers der B6 Topologie

#### 5.4.1 Auslegung der Netzinduktivität

Aufgrund der Limitierung des Eingangsstroms zur effizienten Auslegung der Drossel, wird die Ausgangsleistung bei Blindleistungsbereitstellung reduziert. Dies ist wie bereits in 3.1 erläutert durch den Netzbetreiber gestattet. Der Rippelstrom in der Drossel wird wie gehabt auf 30 % des Effektivstroms ausgelegt, welcher bei Spannungseinbruch auf 90 % am höchsten ist. Der Rippelstrom beträgt somit 88,2 Ampere, siehe Formel 5.4.1-1.

$$I_{\Delta max B6} = \frac{0,3 \cdot \sqrt{2} \cdot 200 \text{kW}}{\sqrt{3} \cdot 617 \text{V} \cdot 0,9} = 88,2 \text{A} \quad (5.4.1-1)$$

Die Induktivität kann durch den gleichen Zusammenhang wie beim IAF IVS ausgelegt werden und beträgt 136  $\mu\text{H}$ , siehe Formel 5.4.1-2.

$$L_{B6} = \frac{U_{LLmaxPeak}}{4 \cdot f \cdot I_{\Delta max B6}} = 136 \text{uH} \quad (5.4.1-2)$$

Die gespeicherte Energie in der Induktivität wird ebenfalls über den Zusammenhang der Netzspannung und Ausgangsleistung definiert, erhöht sich jedoch nicht durch Blindleistungsbereitstellung. Die gespeicherte Energie pro Phase ergibt 4,76 Joule nach Formel 5.4.1-3 und muss aufgrund der Dreiphasigen Ausführung wieder dreifach gewertet werden. Somit ergibt sich eine Gesamtenergie für die Hauptinduktivität der Topologie von 14,28 Joule.

$$E_{LB6} = 0,5 \cdot L_{B6} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 200 \text{kW}^2}{\sqrt{3} \cdot 617 \text{V}} = 4,76 \text{J} \quad (5.4.1-3)$$

#### 5.4.2 Regelung

Die Regelung besteht aus einer Kaskadierten Struktur mit vier Stufen, siehe Abb. 5.4.2-1. Die erste ist die Ausgangsspannungsregelung, welche durch die Sollleistung und Netzspannung die gewünschte äquivalente Phasenimpedanz als Eingangsgröße für die Phasenstromregelung bildet.

In der dritten Stufe wird die Phase mit der mittleren Spannung ausgewählt und die Zwischenkreisspannung  $U_{pn}$  anhand der Phasenlage bestimmt. Die Zwischenkreisspannung resultiert als sechspulsige Gleichspannung und dient als Eingangsspannung für den Tiefsetzsteller. Die mittlere Phasenspannung wird als Referenz für den Tastgrad der entsprechenden Halbbrücke verwendet und prägt somit einen zur Spannung proportionalen Strom ein. Somit wird immer nur eine der drei Halbbrücken getaktet, die anderen beiden sind wie bei einem Diodengleichrichter auf die jeweils positivste und negativste Spannung geschaltet. Die vierte Stufe ist die des Tiefsetzstellers, mit Reglern für den Eingangsstrom sowie die Ausgangsspannung.

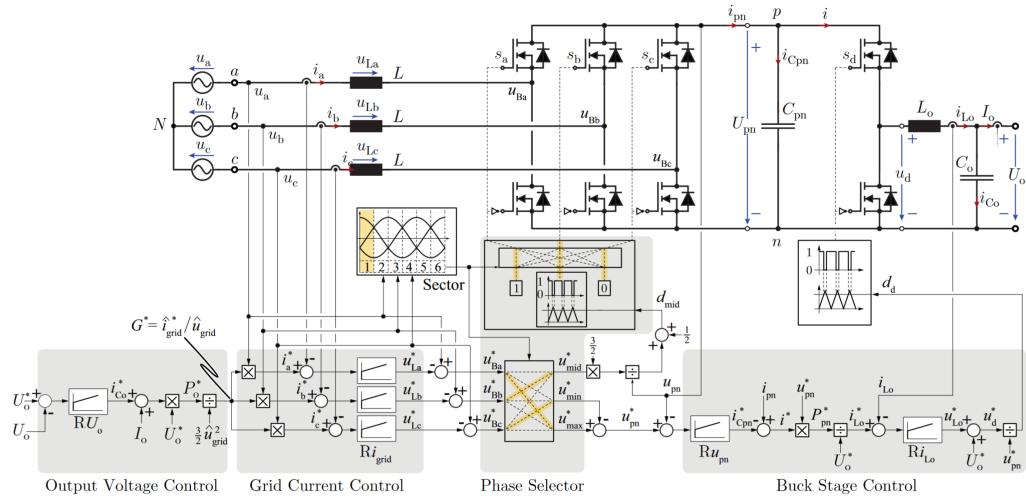


Abbildung 5.4.2-1: Regelung des 1/3-PWM-PFC [8]

Der Aufbau in PLECS besteht für die Ausgangsleistungsregelung aus einem PI-Regler, siehe Abb. 5.4.2-2. Diese wird mit der nominalen Netzspannung zur äquivalenten Netzimpedanz und anschließend durch die aktuelle Netzspannung zu den soll Phasenströmen umgeformt. Um die Phasenverschiebung zu implementieren, wird der Sollstrom entsprechend des Phasenwinkels verzögert an die Regelung der B6 Ansteuerung weitergegeben.

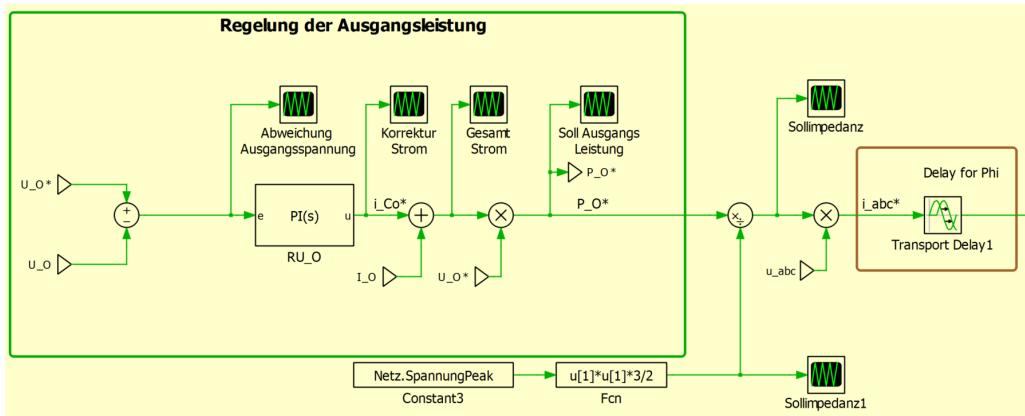


Abbildung 5.4.2-2: PLECS Regelung der Ausgangsleistung als Sollgröße

Im nächsten Schritt wird die Regelung des Netzstroms durch einen weiteren PI-Regler im-

implementiert und mittels PLL und C-Skript die Erkennung der Phasenabschnitte umgesetzt, siehe Abb. 5.4.2-3.

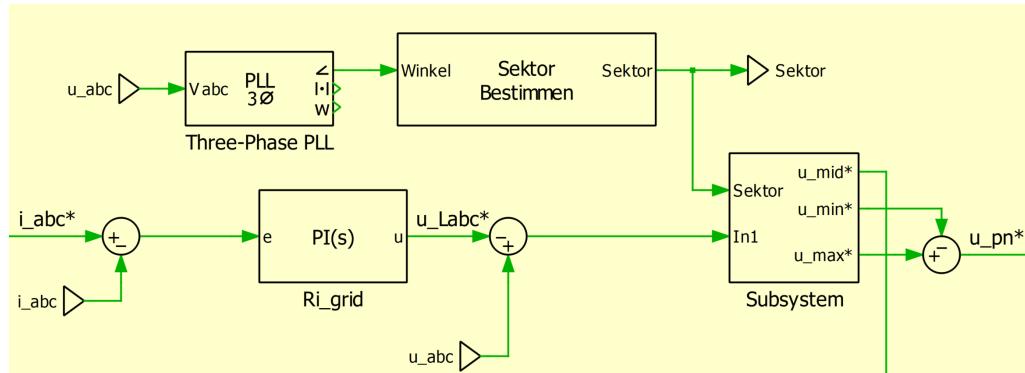


Abbildung 5.4.2-3: PLECS Regelung der Netzimpedanz und Phasenabschnittserkennung

Der Ausgang dieses Blocks dient zum einen mit  $U_{pn}$  als Eingang für den Tiefsetzsteller und zum anderen wird die mittlere Spannung als Eingang für die PWM Erzeugung des B6 verwendet. Die Ansteuerung des Tiefsetzstellers besteht, wie in Abb. 5.4.2-1 dargestellt aus zwei PI-Reglern, die in einen PWM-Generator geführt werden. Anschließend wird das Signal zur Totzeit Implementierung durch eine Einschaltverzögerung ergänzt.

Zum anderen dient die Spannung der mittleren Phase als Eingangsgröße für die Erzeugung des PWM Signals für MOSFET an der mittleren Phase. Dieses wird wieder durch einen PWM-Generator erzeugt und mit Hilfe eines C-Codes werden die Signale den im Sektor passenden Phasen zugeordnet. Der Turn-on Delay dient erneut der Totzeit Implementierung, siehe Abb. 5.4.2-4.

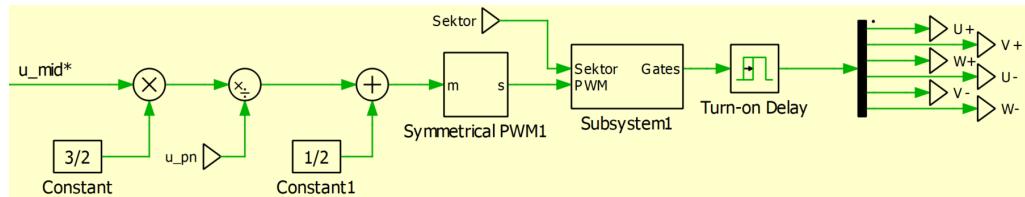


Abbildung 5.4.2-4: PLECS PWM Erzeugung des B6 Gleichrichters

## 6 Auswertung

Die Ergebnisse zur Gesamtbewertung finden sich in Tabelle 6-2. Diese beinhaltet die Hardware, welche zum Großteil durch die Induktivitäten beeinflusst wird, sowie die Kapazitäten, Halbleiter und Treiber. Außerdem werden die Ergebnisse der Simulation durch die Verlustleistung der Halbleiter bewertet. Für die Simulation werden die in Tabelle 6-1 aufgelisteten Betriebsparameter festgelegt. Die beiden Topologien werden für den Betriebspunkt mit  $0^\circ$  und  $30^\circ$  Phasenverschiebung verglichen, um den Einfluss der Systemdienstleistungen zu betrachten. Um einen Vergleich der Kategorien und eine Gesamtbewertung durchzuführen, werden die Einzelkategorien zwischen null und eins normiert und mit einem Gewichtungsfaktor die Summe über alle Kategorien gebildet. Aufgrund des großen Einflusses der Drosseln, werden diese mit 50 Prozent gewichtet. Die Kapazitäten stellen nur einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtsystem dar und werden daher nur mit fünf Prozent bewertet. Die restlichen 45 Prozent fallen auf die Halbleiter in Form der Chipfläche (über den Einschaltwiderstand ( $R_{DSon}$ )), Treiberanzahl und Verlustleistung ab. Je geringer die Punktzahl, desto besser ist die Bewertung.

Netzspannung $U_{LL}$	617 V
Leistung	200 kW bei $\varphi 0^\circ$
Phasenverschiebung	0 / 30 Grad
Kühlplattentemperatur	100 °C
Schaltfrequenz	20 kHz

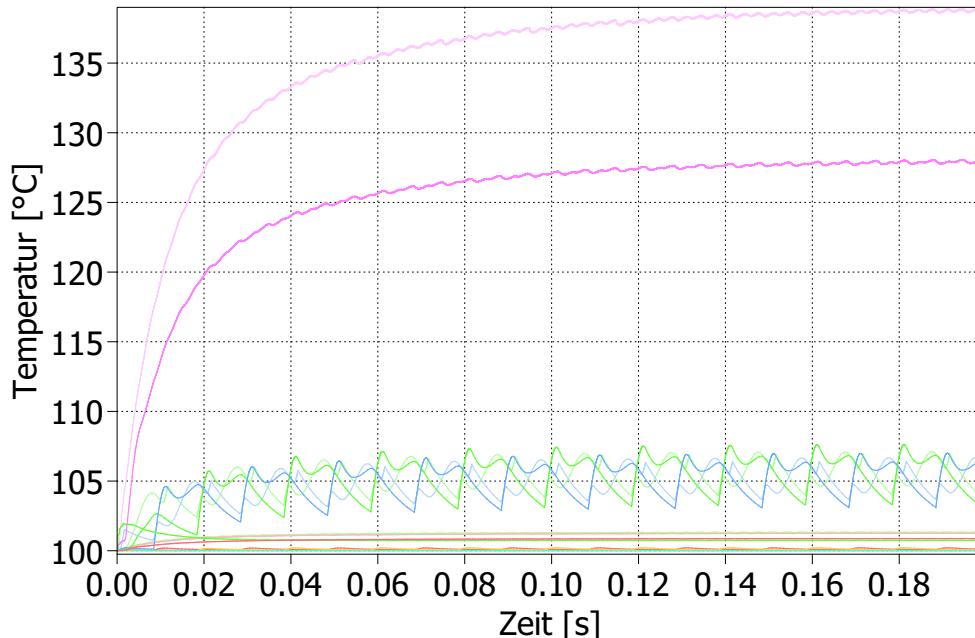
**Tabelle 6-1:** Auflistung der Simulationsbetriebsparameter

	Topologie	B6_Buck	IAF	Gewichtung:
Induktivitäten [uH]	L1 Netzinduktivität	136,0	1,0	
	Gespeicherte Energie [J]	3x 4,8	0,1	
	L2 DC Induktivität	136,0	136,0	
	Gespeicherte Energie [J]	7,8	7,8	
	L3 IAF IVS Induktivität	-	302,2	
	Gespeicherte Energie [J]	-	2,6	
	L3 IAF IVS Induktivität	-	302,2	
	Induktivität normiert:	1,00	0,43	50%
Kapazitäten [uF]	C1 Netzkapazität	-	50,0	
	C2 Kondensator am Elektrolyseur	1,0	1,0	
	C3 DC Zwischenkreis	25,0	50,0	
	Kapazität normiert:	0,26	1,00	5%
Halbleiter	SiC 4 mOhm	0,0	2,0	
	SiC 2 mOhm	10,0	4,0	
	Vienna SiC 5 mOhm	0,0	6,0	
	SiC normiert:	1,00	0,64	15%
	Vienna Diode	0,0	6,0	
	Dioden normiert	0,0	1,0	5%
Treiber	Treiberanzahl	8,0	7,0	
	Treiber normiert:	1,00	0,88	5%
Verluste [W]	Schaltverluste 30 Grad	567,0	503,0	
	Leitverluste 30 Grad	254,0	1311,0	
	30 Grad normiert:	75%	75%	
	Schaltverluste 0 Grad	554,0	511,0	
	Leitverluste 0 Grad	326,0	748,0	
	0 Grad normiert:	25%	25%	
	Verluste normiert:	0,50	1,00	20%
Gesamt		0,813	0,654	

**Tabelle 6-2:** Auflistung der Simulationsergebnisse und Bewertung

## 6.1 B6PFC

Es zeigt sich, dass der 1/3-PWM-PFC deutliche Nachteile bei den Induktivitäten und somit den Hardwarekosten mit sich bringt. Die benötigte dreiphasige Drossel führt dazu, dass in dieser Kategorie der IAF um über 50% besser abschneidet. Anders sieht es bei den übrigen Kategorien aus, es werden weniger Kondensatoren benötigt. Die benötigte B6-Schaltung beinhaltet mehr MOSFET aber dafür keine Dioden. Bei der Verlustleistung zeigt sich der eindeutige Vorteil der Topologie bei der Bereitstellung von SDL, da es fast keinen Einfluss auf die Verluste in den Halbleitern hat. Dies kann anhand des Temperaturverhaltens in Abb. 6.1-1 bestätigt werden, aufgrund der Reduzierung der Ausgangsleistung fällt die Temperatur im Tiefsetzsteller etwas geringer aus, in pink dargestellt. Bei den Halbleiter der B6 Brücke kann praktisch kein Unterschied festgestellt werden. Die Eingangsströme



**Abbildung 6.1-1:** Temperaturverhalten der Halbleiter des B6 mit (voll dargestellt) und ohne (schwach dargestellt) Phasenverschiebung

sind nur leicht durch die Schaltimpulse verrauscht und der Sinusverlauf folgt wie gewünscht der Eingangsspannung, siehe Abb. 6.1-2. Es zeigt sich das der Stromverlauf eine THD von nur etwa 5,8 % besitzt.

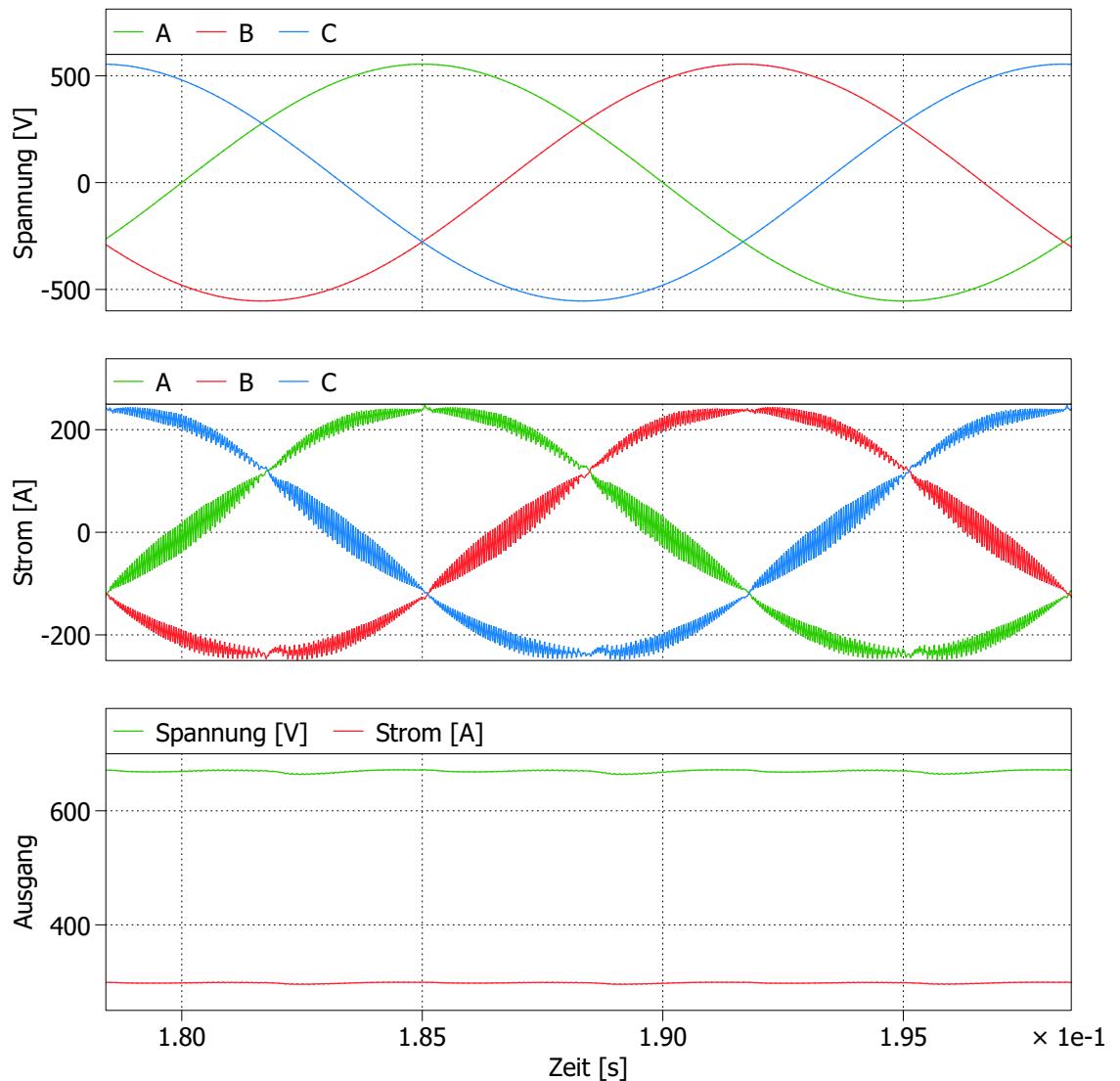


Abbildung 6.1-2: Eingangs- und Ausgangsgrößen ohne Phasenverschiebung

Mit Phasenverschiebung von 30 Grad sieht das verhalten ähnlich aus, siehe Abb. 6.1-3. Der Stromverlauf zeigt eine geringfügig schlechtere THD von 7,1 %, dies kann durch geeignete Filter ausgeglichen werden.

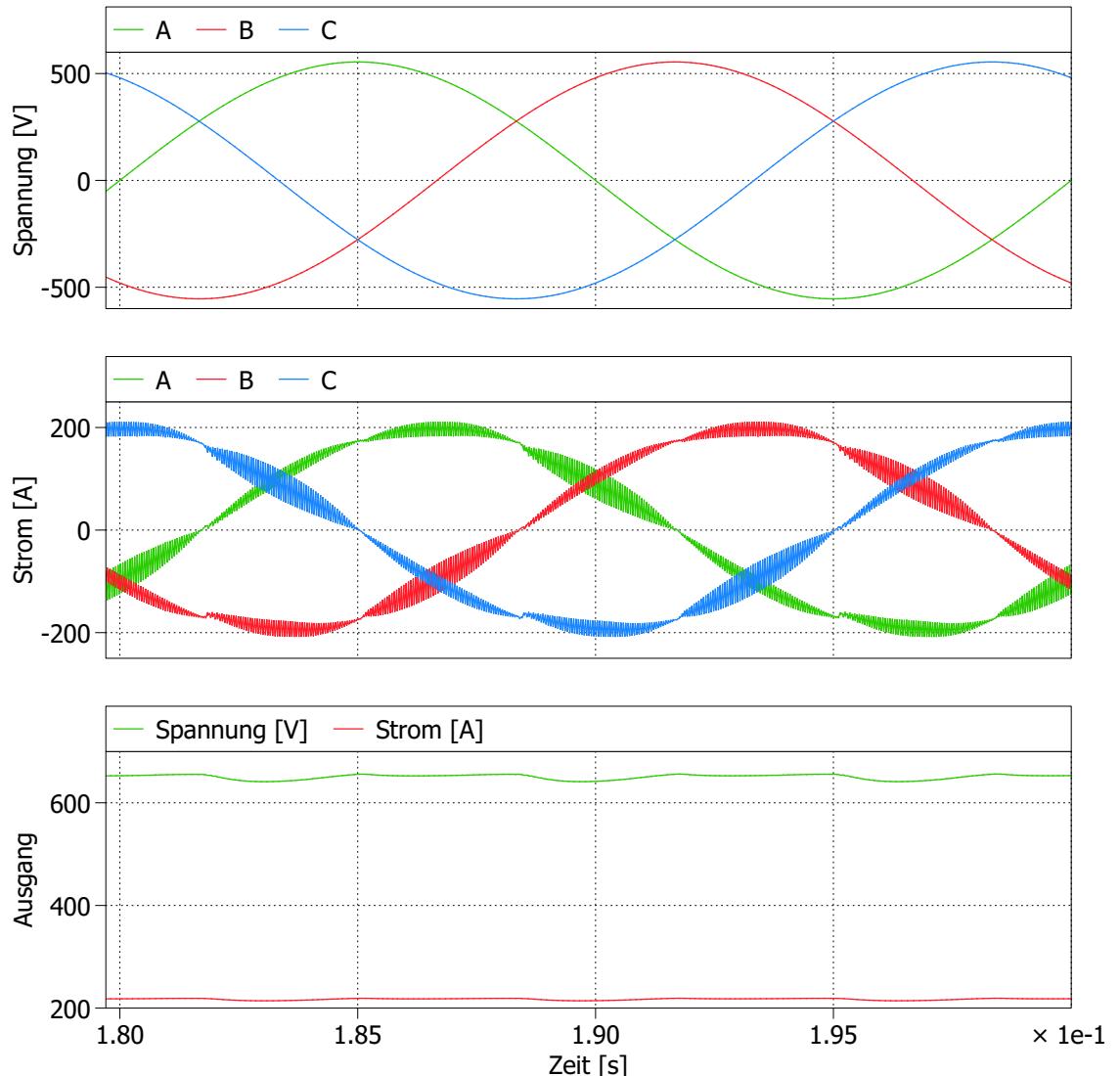


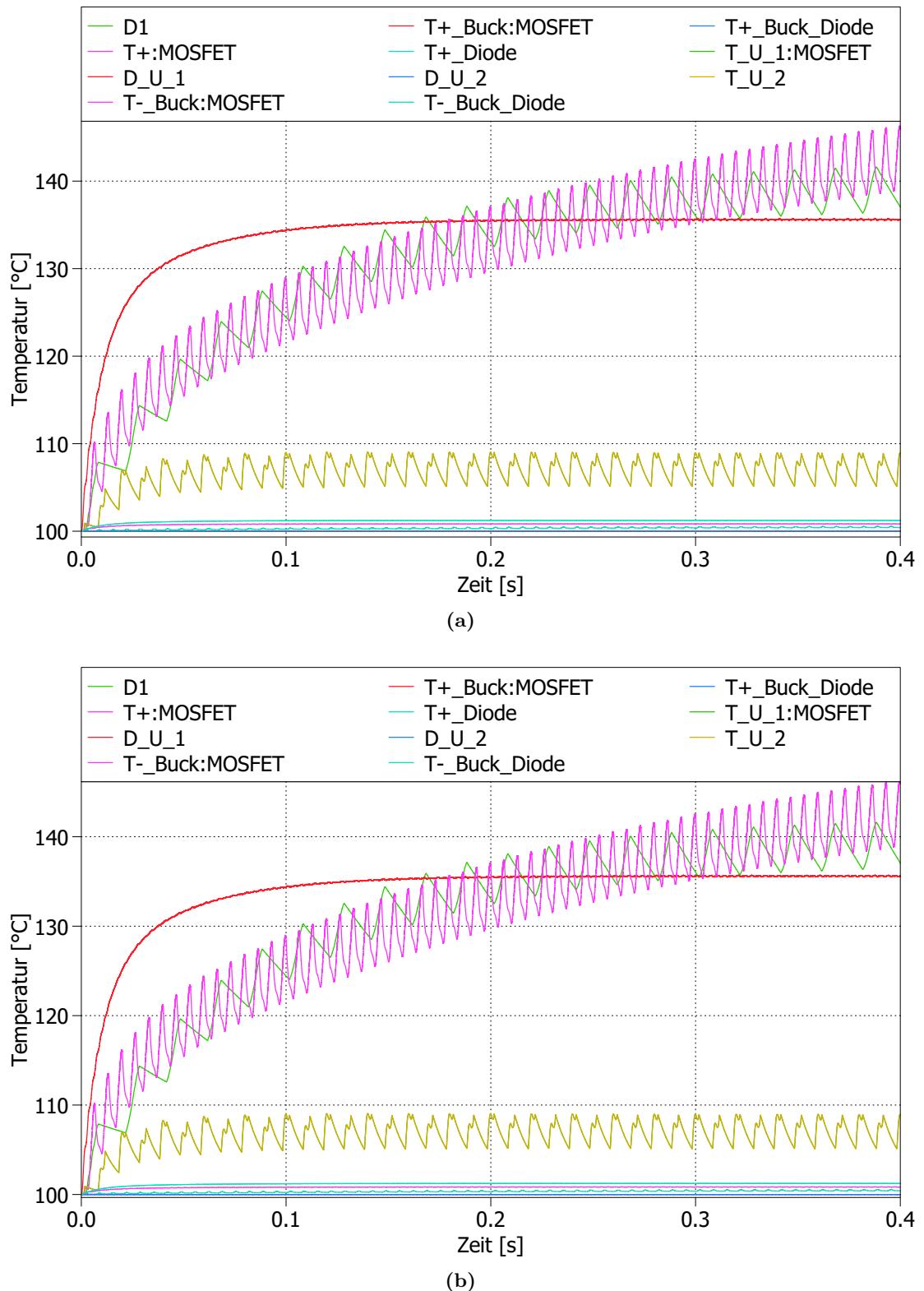
Abbildung 6.1-3: Eingangs- und Ausgangsgrößen mit Phasenverschiebung

## 6.2 IAF

Für die Auswertung werden die Simulationen für eine Dauer von 0,4 Sekunden laufen gelassen, da dann bereits ein Eingeschwungener Zustand erreicht ist. Das Temperaturverhalten der Halbleiter ist in Abb. 6.2-1 dargestellt, hier kann erkannt werden, dass die Kühlplattentemperatur als Startpunkt den Einschwingvorgang deutlich verkürzt. In grün dargestellt als in (a) höchste Temperatur sind die Dioden des Gleichrichters, da diese den Hauptstrom führen. Die Temperatur dieser liegt bei knapp über 140 °C und ist somit unterhalb der erlaubten maximalen Temperatur. In Pink dargestellt, ist die Temperatur der T+/- Halbbrücke, diese steigt ebenfalls bei Blindleistungsbereitstellung. In Rot dargestellt und auch unabhängig von der Blindleistung ist die Temperatur des Tiefsetzstellers.

Die Simulationsergebnisse zeigen den für die Induktivität erwarteten Strom- und Spannungsverlauf mit dreieckiger Form, siehe Abb. 6.2-2. Außerdem ist dem Eingangsstrom ein hochfrequenter Anteil überlagert, welcher sich durch die Schaltfrequenz des Tiefsetzstellers erklären lässt. Außerdem sieht man im Umschaltvorgang des IVS starke Sprünge im Stromverlauf, da der Strom in der Induktivität zwischen den Phasen Kommutieren muss. In Abb. 6.2-3 zeigt sich dieses Problem aufgrund der starken Spannungsunterschiede zwischen den Phasen bei Phasenverschiebung deutlich stärker. Außerdem muss der IVS mehr Strom führen und erzeugt daher stärkere Verlustleistung. Dies ist ebenfalls an der Temperatur des in Abb. 6.2-1 Verlaufs zu erkennen. In (a) ist die Temperatur des IVS in grün dargestellt bei unter 110 °C und in (b) aufgrund des durch die Phasenverschiebung höheren Stroms deutlich gestiegen, bleibt aber unterhalb der zulässigen 175° für die Sperrsichttemperatur.

Aufgrund der Anforderung an Blindleistungsbereitstellung hat die Topologie durch den IVS einen Nachteil, da dieser sprunghafte Änderungen des Stromverlaufs verursacht. Diese starken Sprünge führen dazu, dass die THD des Stroms deutlich verschlechtert wird. Die THD liegt bereits ohne Phasenverschiebung bei etwa 15 % und mit verdoppelt sich diese auf etwa 32 Prozent. Somit kann der IAF den Anforderungen nur sehr schwer gerecht werden, da weitere Filterstufen benötigt würden. Dies lässt sich auch gut anhand der Arbeit von Schrittewieser et Al. sehen, bei deren Prototyp der Filter knapp ein viertel des Volumens ausmacht [13].



**Abbildung 6.2-1:** Temperaturverhalten der Halbleiter des IAF ohne (a) und mit (b) Phasenverschiebung

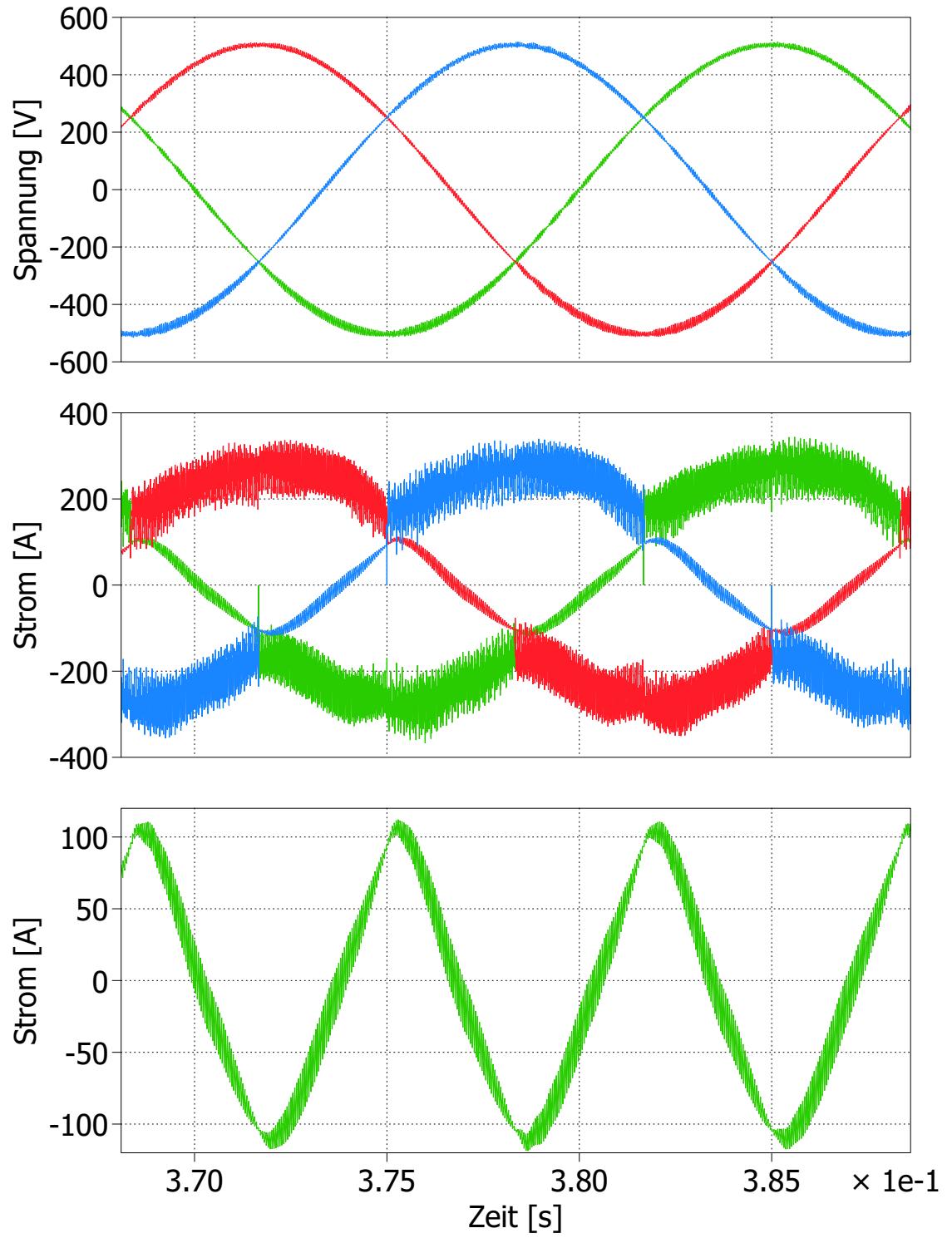
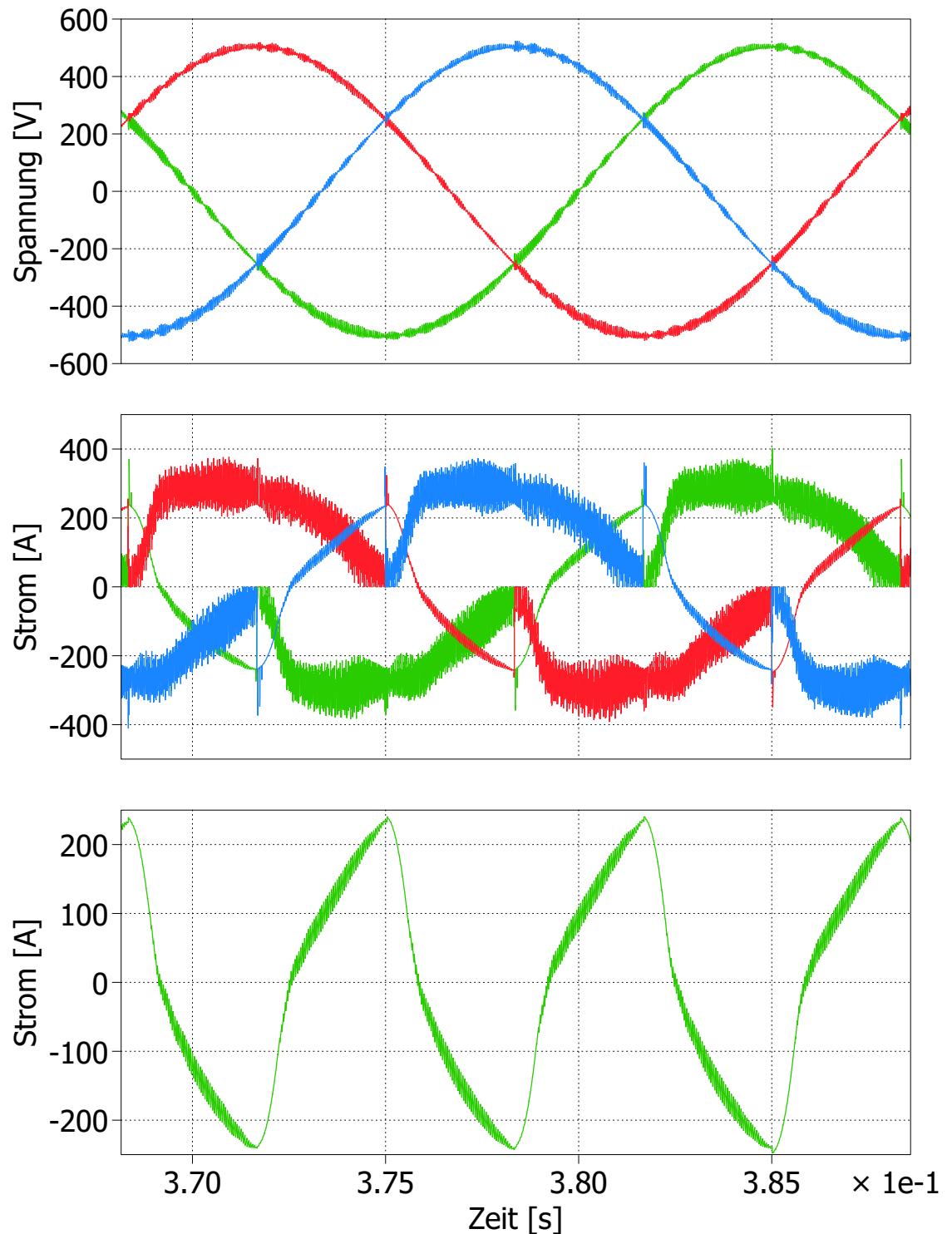


Abbildung 6.2-2



**Abbildung 6.2-3:** Simulationsergebnisse des IAF bei 30 Grad Phasenverschiebung, Eingangsspannung und Ströme, Strom in der IVS Induktivität

## 7 Zusammenfassung & Ausblick

Die Ergebnisse in Tabelle 6-2 geben eine gute Übersicht zum Vergleich mit weiteren Topologien, durch die Gewichtung und Normierung lassen sich weitere Angaben ergänzen. Der IAF schneidet in der Gesamtbewertung um etwa 0,2 Punkte besser ab, dies liegt hauptsächlich an der optimierten Platzierung der Drossel. Jedoch liegt in dieser Zusammenfassung auch der Nachteil der Schaltung im Falle von Phasenverschiebung. Daher kann diese Topologie nach aktuellen Erkenntnissen nicht für diesen Anwendungsfall empfohlen werden. Da der Strom in der Drossel zwischen den einzelnen Phasen geschaltet werden muss, kommt es zu starken Sprüngen im Eingangsstrom was einen deutlich erhöhten Bedarf an Netzfiltern verursacht.

Wie in Kapitel 2 erwähnt, sind die Halbleiter Modelle ein essenzieller Teil, daher sollen diese optimiert und in die Simulation zurück geführt werden. Die für diese Schaltung ausgewählten Halbleiter können dazu beschafft und im Prüfstand vermessen werden. Der Messaufbau dazu ist in Abb. 7-1 dargestellt, er beinhaltet die Schaltzelle mit Mess- und Versorgungsgeräten sowie einer Sicherheitssteuerung. Die Messwerterfassung wird über ein Oszilloskop umgesetzt, welches die automatisierten Messpunkte erfasst und speichert. Anhand dieser Messdaten kann das Modell validiert sowie ergänzt und die Simulationsergebnisse somit optimiert werden.

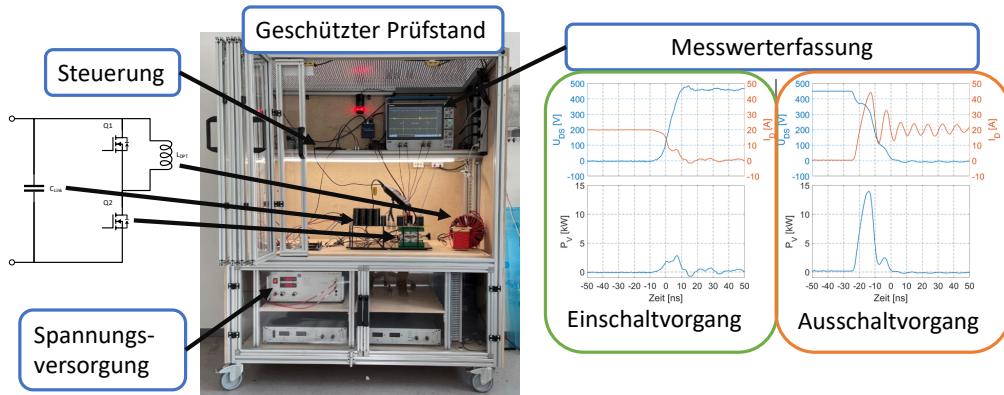
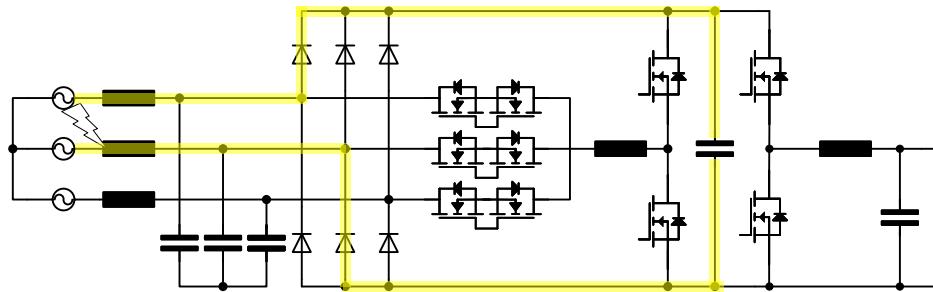


Abbildung 7-1: Doppelpulstestprüfstand

Für den Aufbau eines Demonstrators der finalen Topologie, kann die Auslegung der Halbleiter und Drosseln verwendet werden. Die Regelungen können als Grundlage genutzt werden, müssen aber um Sicherheitsfunktionen ergänzt und insbesondere die Stabilität im Gesamtsystem muss sichergestellt werden. Außerdem erfordert die Implementierung auf Hardwarecontrollern weitere Optimierungen, um die Abtastraten und Reglerverhalten zu definieren. Für SDL und bei Netzfehlern wie Frequenzschwankungen müssen entsprechende Verhalten zur Stabilisierung implementiert werden.

Ein weiterer Punkt ist der direkte Blitzzeinschlag im Stromnetz, welcher zu einer Span-

nungserhöhung führt. Entsprechende Funktionen und Spannungsgeneratoren können in der Simulation eingebaut werden, um die auftretenden Überspannungen an den Halbleitern zu ermitteln. Bei der Betrachtung fällt für die beiden Topologien aufgrund ihres Aufbaus auf, dass immer ein leitender Pfad über die Dioden sichergestellt ist. Die Energie kann somit im Zwischenkreis Kondensator aufgenommen werden, hierbei ist auf die Dimensionierung und auftretende Überspannung an den Halbleitern zu achten. Der Strompfad über die Dioden in den Kondensator ist in Abbildung 7-2 dargestellt und ist identisch zum 1/3-PWM-PFC.



**Abbildung 7-2:** Strompfad im Fall eines Blitzeinschlag beim IAF

Die Schaltungen können außerdem durch Parallelbetrieb mit Interleaving am Ausgang, oder bei entkoppelter Versorgung als Ausgangsseitige Reihenschaltung Betrieben werden, um eine höhere Ausgangsspannung zu erzielen. Dabei werden weitere Regelungsparameter und Tests zur Betrachtung der Stabilität und das auftreten unerwünschter Ausgleichsströme nötig.

# Literatur

- [1] 4 UeNB. *4-UENB-Positionspapier zu Fault-Ride-Through- und Modell- anforderungen an Elektrolyseanlagen*. 2023. URL: [https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/%C3%BCber%20uns/studien%20und%20positionspapiere/frt-anforderungen/4-u%CC%88nb-papier\\_zu\\_elektrolyse\\_frt\\_anforderungen.pdf](https://www.netztransparenz.de/xspproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/%C3%BCber%20uns/studien%20und%20positionspapiere/frt-anforderungen/4-u%CC%88nb-papier_zu_elektrolyse_frt_anforderungen.pdf) (besucht am 27.12.2023).
- [2] Adan, Alberto O. and Tanaka, Daisuke and Burgyan, Lajos and Kakizaki, Yuji. *The Current Status and Trends of 1,200-V Commercial Silicon-Carbide MOSFETs: Deep Physical Analysis of Power Transistors From a Designer's Perspective*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/MPEL.2019.2909592> (besucht am 21.11.2023).
- [3] Wolfgang Böge. *Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker ; mit 281 Tabellen*. 4., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg, 2007. DOI: 10.1007/978-3-8348-9217-1.
- [4] Bohn, Thoralf. *Von statischer Spannungshaltung bis Kurzschlussstrom – Blindleistung für einen sicheren Systembetrieb dena-Workshop „Beschaffung von Systemdienstleistungen“*. 2019. URL: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/SDL\\_Symposium/6\\_Bohn\\_FNN.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/SDL_Symposium/6_Bohn_FNN.pdf) (besucht am 27.12.2023).
- [5] Bortis, Dominik. *Advanced Three-Phase PFC-Rectifiers*. 2019. URL: [https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/workshop\\_publications/\\_ECPE\\_Seminar\\_Augsburg\\_3ph\\_PFC\\_rectifiers\\_210519\\_final\\_V3.pdf](https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/_ECPE_Seminar_Augsburg_3ph_PFC_rectifiers_210519_final_V3.pdf) (besucht am 17.12.2023).
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). *Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie NWS 2023*. URL: [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230726-fortschreibung-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (besucht am 02.11.2023).
- [7] Chen, Mengxing and Chou, Shih-Feng and Blaabjerg, F. and Davari, Pooya. *Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis*. 2022. URL: [10.3390/app12041906](https://doi.org/10.3390/app12041906) (besucht am 20.11.2023).
- [8] David Menzi, Dominik Bortis and Johann W. Kolar. *Three-Phase Two-Phase-Clamped Boost-Buck Unity Power Factor Rectifier Employing Novel Variable DC Link Voltage Input Current Control*. Zurich: IEEE, 2018.
- [9] Infineon. *Datasheet FF2MR12W3M1H B11 EasyPACK module*. 2022. URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF2MR12W3M1H\\_B11-DataSheet-v01\\_10-DE.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd0180f12eb1075411](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FF2MR12W3M1H_B11-DataSheet-v01_10-DE.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd0180f12eb1075411) (besucht am 29.12.2023).
- [10] IRENA. *GREEN HYDROGEN COST REDUCTION SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.

- [11] Martin Jantsch and Cornelis Wilhelmus Verhoeve. *Inverters with three phase output and without electrolyte capacitor for improved lifetime, efficiency and costs of grid connected systems*. 1997. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:51795249> (besucht am 13.10.2023).
- [12] Schmidt, Walter. *Abwaertswandler*. 2023. URL: [http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps/abw\\_hilfe.html](http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/smps/abw_hilfe.html) (besucht am 28.12.2023).
- [13] Schrittwieser, Lukas. *99 Efficient Three-Phase Buck-Type SiC MOSFET PFC Rectifier Minimizing Life Cycle Cost in DC Data Centers*. 2017. URL: <https://doi.org/10.24295/CPSSTPEA.2017.00006> (besucht am 13.10.2023).
- [14] Schrittwieser, Lukas. *Ultra-Efficient Three-Phase Buck-Type PFC Rectifier Systems*. 2018. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000311863> (besucht am 23.11.2023).
- [15] Schroeder, Dierk and Marquardt, Rainer. *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [16] Thiago B. Soeiro, Florian Vancu und Johann W. Kolar. *Hybrid Active Third-Harmonic Current Injection Mains Interface Concept for DC Distribution Systems*. 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2012.2209897> (besucht am 06.01.2024).
- [17] Toepler, Johannes and Lehmann, Jochen. *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [18] Tom Smolinka, Martin Günther (Fraunhofer ISE) und Jürgen Garche (FCBAT). *NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“*. URL: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf> (besucht am 03.11.2023).
- [19] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. *VDE-ARN 4120:2018-11 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)*. Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2018.
- [20] Zhiyu Cao and Peter Wallmeier. *High-Power Rectifier Technologies for Hydrogen Electrolysis*. Warstein: IEEE, 2023.

# **Inhalt der CD**

- Master-Thesis
- Simulationsdaten
- Halbleitermodelle

# **Anhang**

Hier sind wichtige Dinge enthalten bla...