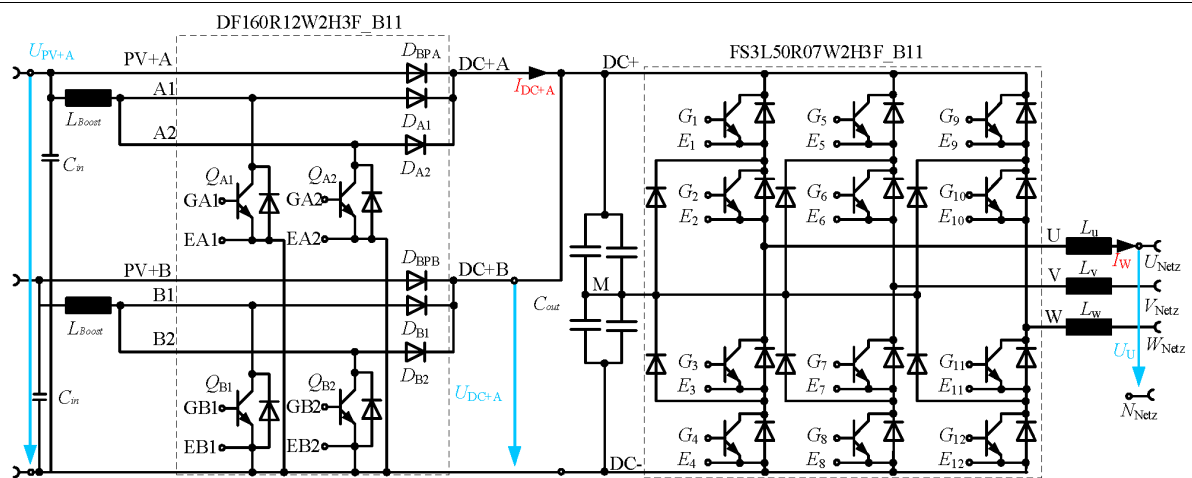




Schlussbericht vom 9.4.2024

oSiC-PVInv

Optimierter SiC PV-Wechselrichter



Quelle: © ZHAW IEF, BFE Projekt oSiC-PVInv 2022



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



School of
Engineering

IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering

Datum: 9.4.2024

Ort: Winterthur

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW School of Engineering, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE)
Technikumstrasse 9, CH-8401 Winterthur
www.zhaw.ch/de/engineering/institute-zentren/iefe/

Autor/in:

Andreas Jehle, ZHAW IEFE, jeha@zhaw.ch
Franz Baumgartner, ZHAW IEFE, bauf@zhaw.ch
Andreas Heinzelmann, ZHAW IEFE, heie@zhaw.ch
Fabian Carigiet, ZHAW IEFE, cari@zhaw.ch
Peter Schmidt, ZHAW IEFE, sctp@zhaw.ch
Patrick Baumann, ZHAW IEFE, baup@zhaw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Roland Brüniger, roland.brueeniger@brueniger.swiss
Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502315-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Projekt oSiC-PVInv wurde ein PV-Wechselrichtersystem basierend auf SiC Halbleiterschaltern mit einem kommerziellen PV-Wechselrichterreferenzsystem mit Si Halbleiterschaltern bezüglich der Konvertereffizienz verglichen. Das Projekt umfasst die Analyse sowie Effizienzmessungen am kommerziellen Si-System. Eine Simulation der neuen SiC-basierten PV-Wechselrichterhardware wurde durchgeführt. Ein neues Hardwaredesign mit Implementierung der Regelung wurde aufgebaut. Die Effizienz des neu entwickelten SiC basierten PV-Wechselrichters wurde bestimmt und mit dem kommerziellen System verglichen. Die ermittelte Effizienz der Boost-Konverterstufe ist hierbei beim neu entwickelten PV-Wechselrichter um 1.39 % - 1.56 % höher als die Effizienz des Referenzwechselrichters. Die Effizienz der NPC-Konverterstufe liegt um 1.08 % - 2 % höher. Somit resultiert eine Effizienzsteigerung von 1.47-3.56 % für das Gesamtsystem, bzw. 2.66 % bezogen auf die jährlich erzeugte Energie unter Berücksichtigung der variierenden PV-Eingangleistungen.

Résumé

Dans le projet oSiC-PVInv, un système d'onduleur photovoltaïque basé sur des commutateurs à semi-conducteurs en SiC a été comparé à un système de référence d'onduleur photovoltaïque commercial doté de commutateurs à semi-conducteurs en Si en termes d'efficacité du convertisseur. Le projet comprend l'analyse et les mesures d'efficacité sur le système commercial, la simulation et la conception du nouveau matériel d'onduleur photovoltaïque basé sur SiC, la mise en œuvre du contrôle, la détermination de l'efficacité du nouvel onduleur photovoltaïque basé sur SiC développé et la comparaison des deux systèmes. L'efficacité déterminée de l'étage du convertisseur élévateur dans le nouvel onduleur photovoltaïque est de 1,39 % à 1,56 % supérieure à l'efficacité de l'onduleur de référence. L'efficacité de l'étage de conversion NPC est supérieure de 1,08 % à 2 %. Cela se traduit par une augmentation de l'efficacité de 1,47 à 3,56 % pour l'ensemble du système, ou de 2,66 % sur la base de l'énergie générée annuellement, en tenant compte de la puissance d'entrée photovoltaïque variable.

Summary

In the oSiC-PVInv project, a PV inverter system based on SiC semiconductor switches was compared with a commercial PV inverter reference system with Si semiconductor switches in terms of converter efficiency. The project includes the analysis and efficiency measurements of the commercial system, the simulation and design of the new SiC-based PV inverter hardware, the implementation of the control, the determination of the efficiency of the newly developed SiC-based PV inverter and the comparison of the two systems. The determined efficiency of the boost converter stage in the new PV inverter is 1.39 % - 1.56 % higher than the efficiency of the reference inverter. The efficiency of the NPC converter stage is 1.08 % - 2 % higher. This results in an efficiency increase of 1.47-3.56% for the entire system, or 2.66% based on the energy generated annually, taking into account the varying PV input power.

Take-home messages

- Der neu entwickelte SiC basierte PV-Wechselrichter hatte im Vergleich zum Referenzwechselrichter eine um 1.39 % - 1.56 % höhere Effizienz in der Eingangsstufe und eine um 1.08 % - 2 % höhere Effizienz der Ausgangsstufe. Dies entspricht einer prozentualen Reduktion der Konverter Verluste von 38.4 % - 53 % bei der Eingangsstufe, bzw. 48 % – 60 % bei der Ausgangsstufe. Das Gesamtsystem hat somit eine Effizienzsteigerung von 1.47-3.56 %, bzw. 2.66% bezogen auf die jährlich erzeugte Energie



- Effizienzmessungen bei PV-Wechselrichtern gestalten sich als schwierig, da die geringen Verluste beinahe im Bereich der Messunsicherheiten liegen. MPP-Tracking oder der «Dynamic Peak Manager» können die Messungen stark verfälschen und sind vorzugsweise zu deaktivieren.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	3
Take-home messages	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	7
1.2 Motivation des Projektes	7
1.3 Projektziele	8
2 Anlagenbeschrieb	8
3 Vorgehen und Methode	10
4 Ergebnisse und Diskussion	12
4.1 Wirkungsgradmessungen an einem Si-basierten Wechselrichters	12
4.2 Selektion der SiC-Halbleiterschalter	16
4.3 Simulativer Vergleich Si-basierter & SiC-basierter Wechselrichter	18
4.4 Design und Umsetzung eines SiC-basierten PV Wechselrichters	21
4.5 Regelung des SiC-basierten PV Wechselrichters	23
4.6 Wirkungsgradmessungen des SiC-basierten Wechselrichters und Vergleich	28
5 Schlussfolgerungen und Fazit	31
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	33
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	33
8 Publikationen	33
9 Literaturverzeichnis	33
10 Anhang	34
10.1 Quellen und Messgeräte	34
10.1.1 Programmierbare bidirectional AC Quelle TC30.528.43-ACS-19031	34
10.1.2 PV Simulator TopCon Quadro	34
10.1.3 Power Analyser Infratek 108A	35
10.1.4 Power Analyser N4L PPA5500	35
10.2 Tabellarische Messergebnisse Si-basierter PV-Wechselrichter	37



Abkürzungsverzeichnis

GaN	Galliumnitrid
IEA	International Energy Agency
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point
NPC	Neutral Point Clamped
PCB	Printed Circuit Board
PECTA	Power Electronic Conversion Technology Annex
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
Si	Silizium
SiC	Siliziumcarbid
WBG	Wide-Bandgap



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Wide-Bandgap (WBG) Halbleiter werden in vielen Anwendungsbereichen Einzug halten. Exemplarische Anwendungsbereiche reichen von der Automobilbranche, Eisenbahnbranche, Automatisierungsindustrie über Datenzentren bis in die Energiebranche. Wichtige Treiber sind Effizienzsteigerungen, Erhöhung der Leistungsdichte, Gewichtsreduktionen, reduzierte Kühlanforderungen und die Vorteile durch höhere Systemspannungen. In Wechselrichtern für PV-Anlagen im mittleren, wie der im Projekt entwickelte PV-Wechselrichter, und im höheren Leistungsbereich über 30 kW werden zunehmend SiC MOSFETs eingesetzt. Freilaufdioden auf Basis von WBG sind dagegen schon vereinzelt, in Verbindung mit herkömmlichen Silizium Leistungstransistoren im Einsatz. Solch ein kommerzieller PV-Inverter stellt für das vorliegende Projekt auch den Benchmark dar. Gemäss der WBG Roadmap von ECPE (European Center for Power Electronics) [1] und der Application Readiness Map von PECTA (Power Electronic Conversion Technology Annex) [2] wird erwartet, dass in den nächsten Jahren SiC MOSFETs in mehr als 50 % der PV-Wechselrichter verbaut werden.

Die Datenbasis rund um den industriellen Einsatz von WBG-Komponenten in Leistungselektroniksystemen ist gering oder nicht umfassend genug. Vielfach sind nur Daten zu individuellen Komponenten verfügbar wie z.B. Halbleitereffizienzen von WBG Leistungsschaltern. Das Ziel des Projektes war daher mit einem im Projekt aufgebauten WBG-System PV-Wechselrichter im Labor unter reproduzierbaren Bedingungen die Effizienzen im Voll- und Teillastbereich zu bestimmen, einzelne Verlustkomponenten zu spezifizieren und relevante Performance-Parameter für die nominelle Leistung von 5 kW zu ermitteln. Die erzielten Messergebnisse wurden mit einem Standardsystem auf Si-Basis verglichen, um Effizienzunterschiede zu quantifizieren und Ertragssteigerungspotentiale zu bestimmen.

1.2 Motivation des Projektes

IEA 4E PECTA wurde 2019 initiiert, um das Potenzial von Wide-Bandgap (WBG) Komponenten (d.h. SiC und GaN) für verschiedene Leistungselektronikanwendungen zu bewerten. Nach der ersten Phase von PECTA wurde deutlich, dass derzeit nur sehr wenige umfassende Daten über WBG-basierte Systeme verfügbar sind. Obwohl eine große Anzahl von Forschungsarbeiten auf verschiedenen Plattformen wie IEEE Xplore usw. verfügbar sind. Forschungsarbeiten berücksichtigen in der Regel nicht alle relevanten Komponenten. Beispielsweise konzentrieren sich einige nur auf die Halbleitereffizienz, während andere die Konverter-Topologie selbst untersuchen, jedoch nicht in Bezug auf Anwendungen im PV-Bereich. Die meisten Veröffentlichungen führen nicht auf, welche Verluste bei den Labormessungen berücksichtigt werden. Daher sind aktuelle Vorhersagen und Prognosen mit großen Unsicherheiten behaftet, sowohl in Bezug auf den Wirkungsgrad als auch auf das Leistungsdichtepotenzial. Das geplante Projekt wird diese offenen Fragestellungen für die Anwendung eines SiC-basierten PV Wechselrichters im 5 kW Bereich beantworten. Dafür wird ein entsprechender Wechselrichter auf Basis einer SiC MOSFET Brücke realisiert, im Labor vermessen und mit dem kommerziellen Si-basierten Wechselrichter verglichen.

Im PECTA Report [3] wurde das Ertragssteigerungspotential durch den Einsatz von WBG-basierten Systemen in verschiedenen Anwendungsbereichen abgeschätzt. Für den PV Bereich weltweit wurde eine durchschnittlicher Wirkungsgradsteigerung von 2 % angenommen. Dies entspricht einer Ertragssteigerung von 20.7 TWh/a und somit dem Jahresverbrauch von ca. 4.6 Millionen Haushalten (Annahme 4500 kWh/a pro Haushalt). Im Jahr 2023 betrug die Schweizer PV Produktion 4.5TWh [4]. Eine 2 % Ertragssteigerung ergibt 90 GWh, was dem Verbrauch von ca. 22000 Haushalten entspricht.



1.3 Projektziele

Gemeinsam mit dem österreichischen Forschungspartner AIT wird ein SiC-basierter PV-Wechselrichter demonstriert, der es ermöglicht fundamentale Fragestellungen wie z.B. das Energieeinsparpotential für SiC im Vergleich zu Silizium-basierter Technologie für PV Systeme im Detail zu klären. Dabei sollen durch die länderübergreifende Kollaboration (AT - CH) eine strategische Stärkung beider Standorte ermöglicht werden.

Für das Projekt wurden die folgenden Ziele formuliert:

1. **SiC-Demonstrator:** Design und Umsetzung eines SiC-basierten PV Wechselrichters.
2. **Wirkungsgrad:** Wirkungsgradmessungen am entwickelten Demonstrator unter Voll- bzw. Teillast zur Bestimmung der relevanten Performance-Parameter bezüglich des Designs und der Komponenten (z.B. Leistungsdichte).
3. **Si-SiC Vergleich:** Vergleichsmessungen des WBG-Systems mit einem Si-basierten PV Wechselrichter (State of the Art) zur Bestimmung der Effizienzsteigerung.
4. **Bewertung:** Es wird eine finale Bewertung durchgeführt, die relevante Teilaspekte wie Topologie, Schaltfrequenz, Filtervolumen etc. berücksichtigt, um ein klares Gesamtbild zu schaffen.
5. **IEA 4E PECTA:** Sämtliche Daten stehen ebenfalls für die Weiterverarbeitung im IEA 4E PECTA zur Verfügung. Anm.: Sowohl Österreich als auch die Schweiz sind Mitgliedsstaaten im entsprechenden Annex (PECTA) und Technologieprogramm (4E).

2 Anlagenbeschreibung

Als Ausgangspunkt des Vergleichs dient ein kommerziell erhältlicher 5 kW Si-PV-Wechselrichter. Die nachfolgenden Spezifikationen (siehe Tabelle 1) und Funktionsbeschreibung des kommerziellen Wechselrichters dienen als Grundlage zur Umsetzung und Entwicklung des Wechselrichters auf Basis von SiC-Halbleiterschaltern (Kapitel 4.4). Die ausführliche Begründung für die Wahl dieses Referenzwechselrichters ist in Kapitel 3 «Vorgehen und Methode» erläutert.

Der Si-PV-Wechselrichter besitzt zwei Leistungsstufen. Die erste Stufe bilden zwei parallele Boost-Konverter für die beiden PV-Eingänge A und B. Die beiden Konverterausgänge sind im DC-Zwischenkreis, dem DC-Link verbunden. Zwischen dem DC-Link und dem Netzanschluss befindet sich die zweite Leistungsstufe, die aus einem NPC (Neutral Point Clamped) Inverter besteht. An den PV-Eingängen können je 5 kW Generatorleistung angeschlossen werden, wobei die maximale Ausgangsleistung des NPC-Inverters bei 5 kW liegt. Dies ermöglicht es zum einen zwei PV-Strings mit unterschiedlicher Ausrichtung z.B. Ost/West mit demselben Wechselrichter zu betreiben. Dabei können zwei unabhängige MPP (Maximum Power Point) Tracker genutzt werden. Zum anderen kann aber auch nur ein PV-String angeschlossen werden. In diesem Fall werden die beiden PV- Eingänge miteinander verbunden und der Wechselrichter kann so konfiguriert werden, dass beide Boost-Konverterstufen «interleaved» betrieben werden, um die Verluste zu reduzieren. Letztere Konfiguration wird beim Bestimmen des Gesamtwirkungsgrades laut DIN EN 50530 verwendet.

Dieser Typ von Wechselrichter hat zwei interne und nicht veränderbare Betriebsmodi. Sie unterscheiden sich auf Grund der anliegenden Eingangsspannung und beeinflussen das Verhalten der Boost-Stufe. Liegt eine Spannung kleiner als 595 V am Eingang an, so arbeiten die Boost-Konverter und setzen die Eingangsspannung auf die angestrebten 595 V des DC-Links hoch. Der NPC-Inverter regelt die DC-Link Spannung und die Boost-Konverter übernehmen das MPP-Tracking und regeln somit die Spannung am Wechselrichter Eingang, um den maximalen Ertrag des PV-Strings zu gewährleisten. Sobald die Spannung an den PV-Eingängen grösser oder gleich 595 V ist, werden die Halbleiterschalter im Boost-Konverter nicht mehr aktiv angesteuert. Der Boost-Konverter wird mit Bypass-Dioden



überbrückt. In diesem Fall muss der NPC-Inverter das MPP-Tracking übernehmen. Dieser regelt die Spannung am DC-Link so, dass der PV-String den maximalen Ertrag liefert. In beiden Betriebsmodi beträgt die Schaltfrequenz aller Halbleiterschalter 20 kHz und das Modulationsschema des NPC-Inverters entspricht einem «Carrier based PWM».

Anmerkung: Die beiden Betriebsmodi beziehen sich auf miteinander verbundene PV-Eingänge. Bei unabhängigen Eingängen können weitere Fälle auftreten, z.B. wenn nur einer der PV-Eingänge eine Spannung von grösser oder gleich 595 V hat.

Die Halbleiterschalter für die Boost-Konverter sind im Leistungsmodul «DF160R12W2H3F_B11» von Infineon integriert. Das Modul besteht aus zwei SiC Bypass-Dioden und vier Si-IGBTs mit je einer SiC Diode, wobei jeweils zwei dieser Si-IGBTs parallel pro Boost-Konverter betrieben werden. Die Bypass-Dioden dienen zur Überbrückung der Konverter, sobald an den Eingängen Spannungen ≥ 595 V anliegen. Die zwölf Leistungshalbleiter für den NPC-Inverter sind ebenfalls in einem Leistungsmodul integriert. Dieses Modul vom Typ «FS3L50R07W2H3F_B11» von Infineon besteht aus Si-IGBTs und Dioden auf Basis von SiC. Das elektronische Schema der beschriebenen Leistungsstufen ist in Abbildung 1 ersichtlich. Kenndaten sind in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Kenndaten des kommerziellen Wechselrichters.

Parameter	Kenndaten	Parameter	Kenndaten
Anzahl MPP-Tracker	2	Schaltfrequenz	20 kHz
Eingangsleistung	10 kW	Betriebsmodi	2 (<595 V & ≥ 595 V)
Ausgangsleistung	5 kW	Boost-Konverter	DF160R12W2H3F_B11
Nom. Eingangsspannung	595 V	Halbleiter (Boost)	Si-IGBT mit SiC Diode
Max Eingangsspannung	1000 V	Eingangsinduktivität	$\sim 900 \mu\text{H}$
MPP-Spannungsbereich	163 V – 800 V	Modulation (Boost)	Interleaved
Startspannung	200 V	NPC-Inverter	FS3L50R07W2H3F_B11
EU-Wirkungsgrad	97.3 %	Halbleiter (NPC)	Si-IGBT mit SiC Diode
Netzanbindung	3NPE 400 V	Modulation (NPC)	Carrier based PWM

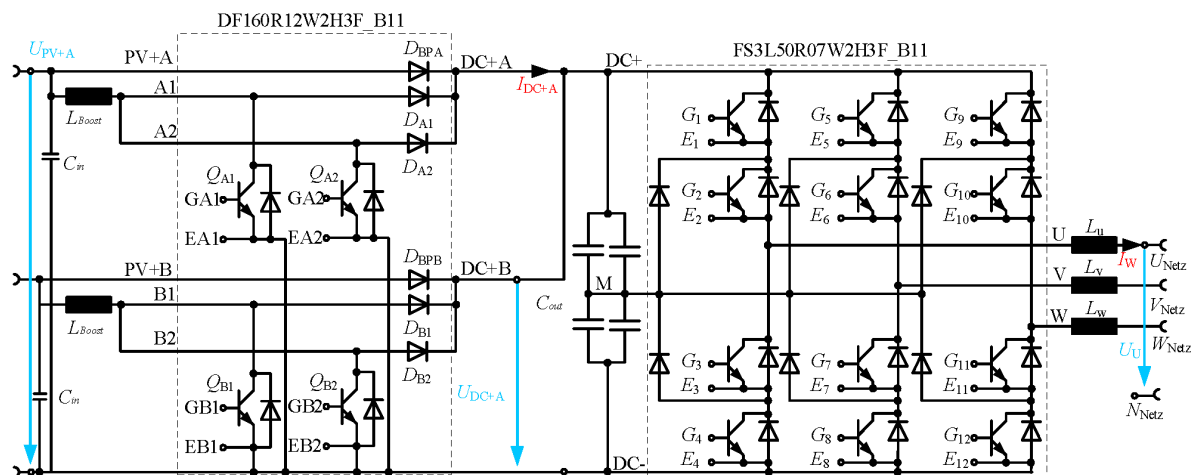


Abbildung 1: Elektronische Schaltung der Leistungsstufen des Referenzwechselrichters mit konventionellen Si Leistungstransistoren.



Der im Projekt entwickelte SiC-basierte Wechselrichter besitzt die gleiche Topologie wie der kommerzielle Si-basierte Wechselrichter, wodurch ein fundierter Vergleich zwischen Silizium- und SiC-basierter Technologie möglich ist. Dies beinhaltet, dass die Schaltungstopologie, die Betriebsmodi, die Modulationsverfahren und der Arbeitsbereich gleich sind. Dafür wurde auch ein zweiter baugleicher Wechselrichter besorgt, sodass die gleichen passiven Bauelemente wie z.B. die beiden Eingangs-, sowie die drei Ausgangsinduktivitäten verwendet werden konnten.

3 Vorgehen und Methode

In einem ersten Schritt musste ein repräsentativer Wechselrichter gefunden werden, der dem aktuellen Stand der Technik gerecht wird, dessen Inverter-Topologie bekannt ist und der im Leistungsbereich zwischen 5 und 10 kW liegt. Der ausgewählte Wechselrichter gab somit die Nennleistung und Topologie des neu entwickelten SiC-basierten Wechselrichters vor. Die gleiche Topologie erlaubt es mittels detaillierten Labormessungen im spannungsabhängigen Teil- und Volllastbereich die beiden Systeme miteinander vergleichen zu können. Die Wahl fiel auf einen dreiphasigen PV-Wechselrichter, der eine 3-Level Umrichter-Topologie in Form eines NPC-Inverters besitzt. Dreiphasige Wechselrichter sind marktdominierend in der Schweiz. Der Hauptgrund hierfür liegt an regulatorischen Anschlussbedingungen. Zudem ergab die Rücksprache mit Fachexperten, dass 3-Level Inverter-Topologien in diesem Leistungsbereich häufig zum Einsatz kommen.

Der kommerzielle Wechselrichter wurde im Labor der ZHAW geöffnet und analysiert. Dabei konnte die Schaltung in Abbildung 1 identifiziert werden. Um die Funktionsweise bzw. die Betriebsmodi des Wechselrichters zu identifizieren, wurden zudem die Ansteuerungssignale der Si-IGBT-Schalter vermessen und analysiert.

In einem weiteren Schritt wurde festgestellt, dass der Boost-Konverter und der NPC-Inverter durch Auftrennen des DC-Links und Einbindung einer Strommessung einzeln vermessen werden konnten. Hierbei wurde die Funktionalität des Wechselrichters nicht beeinträchtigt. Des Weiteren erlaubt das Design der Platine die Verbindungen der Eingangsfiler zum Eingang des Boost-Konverters bzw. die Verbindung von NPC-Inverter zu den Ausgangsfiltren aufzutrennen. Somit konnten auch dort Strommessungen angebracht werden. Diese Möglichkeiten wurden beim Aufbau des neuen SiC-basierten PV-Wechselrichters ebenfalls gewährleistet. Somit waren bei beiden Wechselrichtern Effizienzmessungen des Gesamtsystems und der einzelnen Teilkonverter jeweils mit und ohne Filter möglich.

Neben dem eigentlichen Umwandlungswirkungsgrad des Wechselrichters:

$$\eta_{PV2AC,conv} = \frac{\int_0^T P_{AC}(t) * dt}{\int_0^T P_{DC}(t) * dt} \quad ([5])$$

besitzen PV-Wechselrichter noch einen MPPT-Wirkungsgrad:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^T P_{DC}(t) * dt}{\int_0^T P_{MPP}(t) * dt} \quad ([5])$$

Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis der tatsächlich entnommenen Leistung des PV-Simulators zur theoretisch bereitgestellten Leistung (gemäss Formel 1 des Effizienzleitfadens [6]). Der Umwandlungswirkungsgrad bezüglich der normalisierten Bemessungsausgangsleistung η wird gemäss EN 50530 Anhang E berechnet. Der Gesamtwirkungsgrad $\eta_{PV2AC,t}$ wird gemäss Kapitel 5 der DIN-EN 50530 berechnet. Dort gilt: $\eta_t = \eta_{conv} * \eta_{MPPT}$. Der gemessene MPPT-Wirkungsgrad des Referenzwechselrichters lag im Bereich von 99.5 % - 99.8 %. Da dieser Wirkungsgrad jedoch nicht von den Komponenten abhängig ist, wurde er beim Vergleich der beiden Wechselrichter nicht mitgemessen, d.h. das MPP-Tracking des Wechselrichters wurde deaktiviert, damit bei konstanter Eingangsspannung gemessen werden konnte.



Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung des verwendeten Messaufbaus. Die Messungen wurden bei minimaler (163 V), nominaler (595 V) und maximaler (800 V) MPPT-Spannung durchgeführt. Die Messwerte wurden über einem Intervall von 10 Minuten (600 Sekunden bzw. 600 Messwerte) gemittelt. Die Ergebnisse wurden anschliessend ausgewertet (Kapitel 4.1).

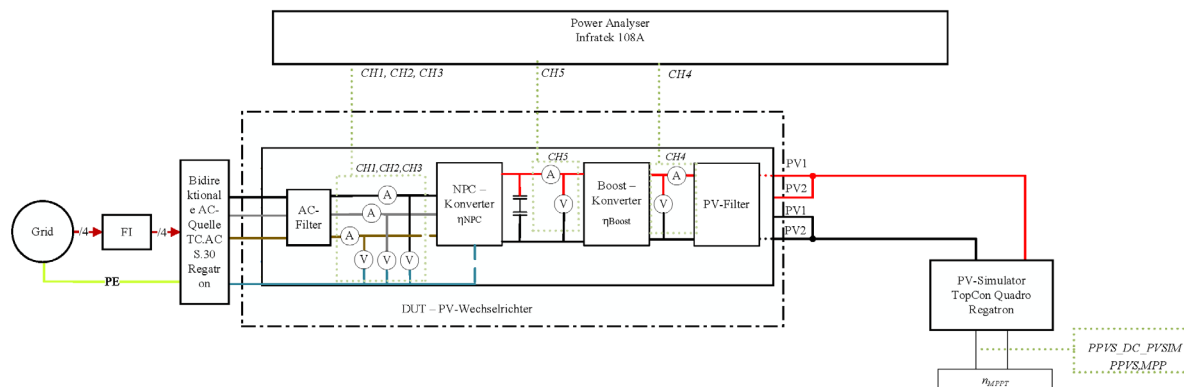


Abbildung 2: Messaufbau zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Boost-Konverters und NPC-Inverters des Referenzwechselrichters (ohne AC- und PV-Filter).

Basierend auf diesen Messungen und Analysen konnte der Anlagenbeschrieb, sowie deren Kenndaten, gemäss Kapitel 2 erstellt werden. Die Ergebnisse wurden zusammen mit dem Projektpartner AIT intensiv besprochen. Sie waren die Ausgangslage für die Entwicklung des SiC-basierten Wechselrichters in Kapitel 4.4.

Das AIT konnte anschliessend mit der Auswahl der SiC-Leistungshalbleitern beginnen (Kapitel 4.2), welches auch im Hinblick auf ihren Industriepartner Infineon erfolgte. Dafür wurde der Wechselrichter unter Verwendung verschiedener Produkte simuliert. Anhand der simulierten Verluste konnten die SiC-Leistungsschaltermodule selektiert werden. Anschliessend wurde ein erster simulativer Vergleich der Konverter erstellt (Kapitel 4.3). Parallel dazu wurde von der ZHAW der Microcontroller «STM32G474RETxLQFP64» der Firma STMicroelectronics ausgewählt. Mit diesem werden die 16 Schalter angesteuert und die volle Funktionalität des Wechselrichters gewährleistet.

Im Austausch mit dem AIT wurden zudem die Schnittstellen des leistungselektronischen PCBs (Printed Circuit Board) und deren Pin-Belegungen definiert, um die Ansteuerungssignale vom Microcontroller zum Leistungsboard bzw. die Messsignale vom Leistungsboard zum Microcontroller zu bringen. Nach dem Aufbau des SiC-basierten Konverters am AIT wurde dieser im gesteuerten Betrieb am AIT in Betrieb genommen und anschliessend an die ZHAW ausgeliefert. An der ZHAW wurde die Regelung des Wechselrichters ausgelegt und simuliert (Kapitel 4.5). Die Regelung verwendet hierbei dieselben Regelungsmethoden wie der Referenzwechselrichter.

Durch die geringe verbliebene Projektzeit und Problemen bei der Inbetriebnahme waren zum Projektende allerdings keine ausführlichen Messungen zur Bestimmung des Wirkungsgrades wie in Kapitel 4.1 mehr möglich und führten daher zu einer Änderung der Strategie. Die Vermessung des SiC-basierten PV-Wechselrichter wurde einzeln und gesteuert ausgeführt. Die aus diesen Messungen resultierenden Effizienzen wurden dann mit entsprechenden Messungen des Si-basierten PV-Wechselrichters verglichen (Kapitel 4.6).



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Wirkungsgradmessungen an einem Si-basierten Wechselrichter

Die Wirkungsgrade des gesamten Wechselrichters, als auch den Teilleistungsstufen Boost-Konverter und 3-Level NPC-Inverter, wurden bei je minimaler (163 V), nominaler (595 V) und maximaler (800 V) MPP-Eingangsspannung, sowie unter Volllast (100 %) bzw. Teillast (5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 % und 75 %) gemessen. Für die Messungen wurden der MPP Tracker und der «Dynamic Peak Manager» deaktiviert, um bei konstanter Eingangsspannung zu messen und die dynamischen Regeleinflüsse auf die Konvertereffizienz zu eliminieren. Ausserdem wurden die Wirkungsgrade bei allen Arbeitspunkten einmal mit und einmal ohne die Eingangs- bzw. Ausgangsfilter vermessen. Das Messschema ist in Abbildung 2, Kapitel 3 dargestellt. Alle 5 Kanäle des Leistungsanalysators mit je einer Spannung- und Strommessung wurden synchronisiert, so dass alle Messwerte zum selben Zeitpunkt aufgezeichnet wurden.

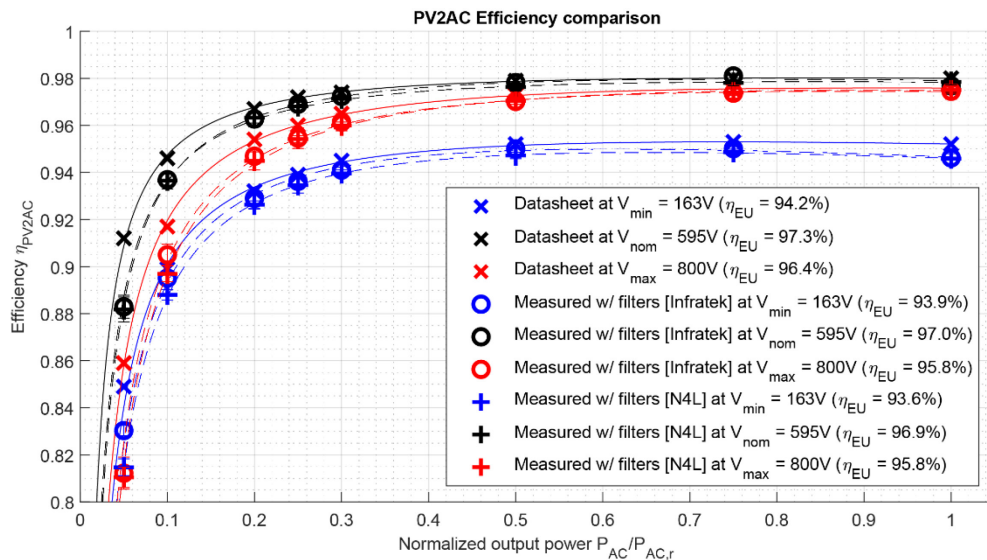


Abbildung 3: Wirkungsgradverlauf (η) des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters bei unterschiedlichen PV-Spannungen und Ausgangsleistungen - Vergleich zu Datenblattangaben (Messunsicherheiten der Labormessungen sind bei den Messpunkten nach [8] aufgeführt).

Die Netzspannung bei der Messung wurde mit der programmierbaren bidirektionalen AC-Quelle Regatron TC.ACS.30 erzeugt, während ein PV Simulator TopCon Quadro als DC-Quelle am PV-Eingang verwendet wurde. Power Analyzer der Marke Infratek und N4L wurden für die Effizienzmessung verwendet. Die Messmittel und Quellen sind in Anhang 10.1 aufgeführt.

Abbildung 3 zeigt die gemessenen Wirkungsgrade des Referenzwechselrichters (mit Filtern) für die Messungen mit den beiden unterschiedlichen Power Analyzern im Vergleich zu den Datenblattwerten des Herstellers. Die blauen Messpunkte beziehen sich auf die Messung bei der fixen Eingangsspannung von 163 V, die Schwarzen auf die nominale Eingangsspannung von 595 V und die Roten auf die maximale Spannung von 800 V. Die Euro-Wirkungsgrade berechnen sich aus den gewichteten Wirkungsgraden bei 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 50 % und 100 % der Nennleistung gemäss der Formel (1) [7].

$$\eta_{EU} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.1 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.2 \cdot \eta_{100\%} \quad (1)$$

Mit dem Power Analyzer von Infratek wurde bei nominaler Spannung ein Euro-Wirkungsgrad von 97.0 % gemessen. Dieser Wert ist 0.3 % niedriger als die Herstellerangabe. Die gewichteten Wirkungsgrade



bei 163 V bzw. 800 V betragen 93.9 % bzw. 95.8 %. Im Vergleich zu den Herstellerangaben beträgt die Differenz 0.3 % bzw. 0.6 %. Auch hier wurde ein geringerer Wirkungsgrad gemessen. Den grössten Einfluss auf diese Differenz haben die Messungen bei einer Teillast von 5 % bzw. 10 %. In diesen Arbeitsbereichen wurden zwischen 0.4 % und 4.7 % tiefere Wirkungsgrade gemessen. Auf Grund dieser Abweichungen erfolgte eine weitere Messreihe mit einem anderen Messgerät des Hersteller N4L, um systematische Messfehler durch das Messgerät auszuschliessen. Ein weiterer Einflussfaktor betrifft die Lastpunkte, bei denen der Hersteller die Wirkungsgradmessung durchgeführt hat. Gemäss der Norm DIN-EN-50530 kann die gemessene Ausgangsleistung um ± 5 % vom eigentlichen Teillast- bzw. Volllastarbeitspunkt abweichen. Das bedeutet z.B., dass bei 5 % Teillast (250 W) der gemessenen Arbeitspunkt zwischen 237.5 W und 262.5 W liegen darf. Die Wirkungsgradunterschiede an den beiden Eckwerten liegt zwischen 0.7 % und 1.0 % unter Betrachtung der Fits in Abbildung 3 bei nominaler Spannung. Des Weiteren müssen die Messungen noch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit nach GUM eingeordnet werden. Beispielsweise betrug die kombinierte Messunsicherheit des Wirkungsgrades bei nominaler Spannung und Vollast 0.38 % ($k=2$), was den Unsicherheiten für zuverlässige Messungen in unabhängigen, renommierten Messlabors entspricht [8].

Die Messungen mit Filter zeigen, dass der gesamte PV-Wechselrichter mit kleiner Eingangsspannung (163 V) die geringste Effizienz aufweist. Dies ist auch der einzige Betriebspunkt, bei welchem der Boost-Konverter selbst arbeitet. Bei einer Eingangsspannung von 595 V endet der Boost-Betrieb und die Eingangsspannung entspricht im Prinzip der DC-Link-Spannung. Eine Effizienz von 97 % wird erreicht. Bei 800 V Eingangsspannung sinkt die Effizienz auf 95.8 %.

Um den Anteil der Verluste durch die Filter zu untersuchen wurden weitere Messungen ohne Filter (Abbildung 4) durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass die so gemessenen Effizienzwerte 1 % - 1.2 % höher sind, d.h. zwischen 18 % und 33 % der Verluste in den Filtern entstehen.

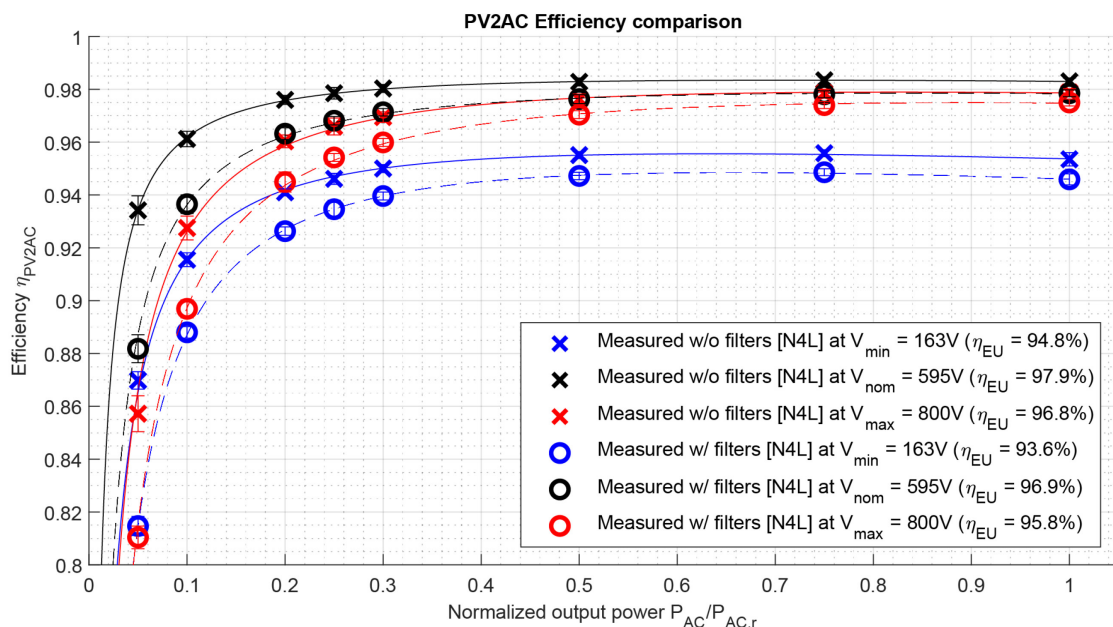


Abbildung 4: Wirkungsgradverlauf (η) des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters bei unterschiedlichen PV-Spannungen und Ausgangsleistungen ohne PV-Eingangsfiler und Netzfilter (Messunsicherheiten der Labormessungen sind bei den Messpunkten nach [8] aufgeführt).



Um den Einfluss der einzelnen Teilkonverter auf die Gesamteffizienz zu bestimmen, wurden weitere Messungen zur Bestimmung für die einzelnen Teilkonverter mit Filter (Abbildung 5) und ohne Filter (Abbildung 6) durchgeführt. Der Wirkungsgrad η_{Boost} des Boost-Konverters wurde wie folgt berechnet:

$$\eta_{Boost} = \frac{\overline{P}_{BoostInfra}}{\overline{P}_{PVSInfra}}$$

Der Wirkungsgradverlauf des nachgeschalteten NPC-Konverters ergibt sich wie folgt:

$$\eta_{NPC} = \frac{\overline{P}_{AC}}{\overline{P}_{BoostInfra}}$$

Im Boost-Konverter liegen die Wirkungsgrade bei 595 V bzw. 800 V über 99 %. Dies liegt daran, dass in diesen Arbeitspunkten der Boost-Konverter deaktiviert und durch die SiC-Bypass-Dioden im Leistungsmodul (DF160R12W2H3F_B11) überbrückt wurde. Bei der minimalen Eingangsspannung von 163 V sind die Wirkungsgrade zwischen 93.2 % und 98.6 %.

Beim 3-Level NPC-Inverter können zwei Effekte erkannt werden. Zum einen weist der NPC-Inverter ähnliche Wirkungsgrade bei PV-Eingangsspannungen von 163 V und 595 V auf, da die gleiche DC-Link Spannung (Eingangsspannung des NPC-Inverters) vorhanden ist. Der zweite Effekt betrifft den Wirkungsgrad bei maximaler Eingangsspannung. Bei den Arbeitspunkten bei DC-Spannungen 595 V und 800 V entspricht die Spannung im DC-Link gleich der Eingangsspannung, da der Boost-Konverter in diesem Fall deaktiviert ist. Der NPC-Inverter wird in diesem Fall zur Umrichtung von Gleichstrom in Wechselstrom als auch zur Senkung der Spannung auf die Netzspannung verwendet. Obwohl bei höherer Spannung am DC-Link und unter gleichen Lastpunkten der Strom tiefer ist, als bei den anderen beiden Messreihen, und somit die ohmschen Verluste abnehmen, überwiegen die spannungsabhängigen Verluste. Infolgedessen sinkt der Wirkungsgrad.

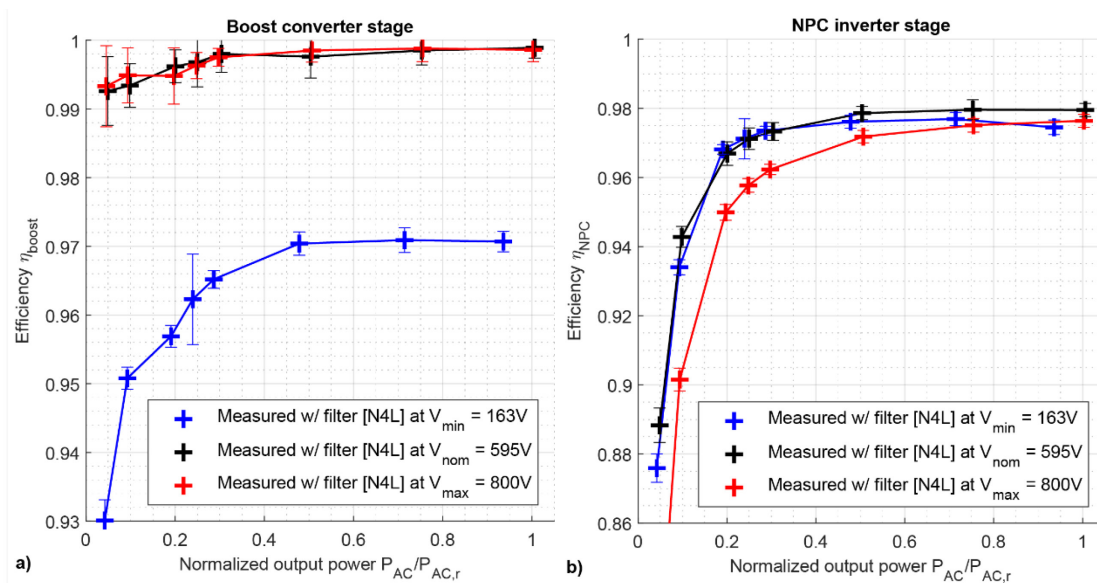


Abbildung 5: Wirkungsgradverlauf (η) des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters bei unterschiedlichen PV-Spannungen und Ausgangsleistungen mit PV-Eingangsfilter und Netzfilter für die einzelnen Konverter (Messunsicherheiten der Labormessungen sind bei den Messpunkten nach [8] aufgeführt).

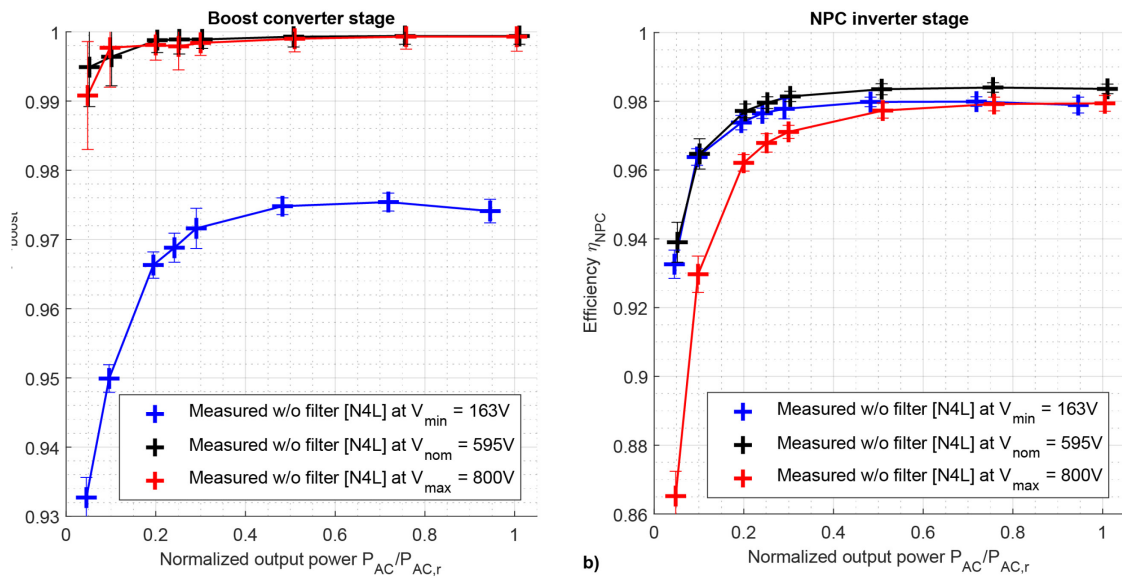


Abbildung 6: Wirkungsgradverlauf (η) des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters bei unterschiedlichen PV-Spannungen und Ausgangsleistungen ohne PV-Eingangsfiler und Netzfilter für die einzelnen Konverter (Messunsicherheiten der Labormessungen sind bei den Messpunkten nach [8] aufgeführt).



4.2 Selektion der SiC-Halbleiterschalter

Für die Auswahl der SiC-Halbleiterschalter für den Boost-Konverter wie auch für den NPC-Inverter wurden Simulationen erstellt. Als Simulationsumgebung diente die Software PLECS von Plexim. Dies ermöglichte es eine erste simulationsbasierte Bewertung der Effizienzen verschiedener Leistungsschaltermodule zu erstellen, um die SiC-Bauelemente zu klassifizieren. Die Leistungsschaltermodule wurden mit ähnlichen Spannungs- und Stromwerten, wie die zu ersetzenden Si-IGBT-Module des Referenzwechselrichters, getestet. Bei den Simulationen wurden Halbleiterschaltverluste, Halbleiterleitverluste, Widerstandsverluste der Induktivität (Tabelle 2) und die Kapazitäten (470 μF , ESR = 130 $\text{m}\Omega$ @ 20 kHz) berücksichtigt. Die Simulationen wurden sowohl spannungs- als auch leistungsabhängig durchgeführt. Die Simulationsergebnisse der Verlustleistungen für die verschiedenen untersuchten Leistungsschaltermodule für den Boost-Konverter sind in der Tabelle 3 aufgelistet und jene für den NPC-Inverter sind in der Tabelle 4 ersichtlich.

Tabelle 2: Induktivitätswerte der Filter

Induktivität	Induktivitätswert	DC Widerstand ($\text{m}\Omega$)	R @ 50 Hz ($\text{m}\Omega$)	R @ 20 kHz (Ω)	Resonanzfrequenz
Boostinduktivität	812 μH	29	35	1.181	500 kHz
Ferrit (NPC)	3 μH	-	<1	0.001	>50 MHz
Hauptinduktivität (NPC)	1 mH	35	70	2.302	550 kHz

Tabelle 3: Simulierte Verluste verschiedener SiC Leistungsschaltermodule und Vergleich mit dem Si-basierten Leistungsmodul des Referenzwechselrichters für den Boost-Konverter bei 1 kW, 2.5 kW und 5 kW und bei verschiedenen Eingangsspannung von 163 V, 595 V und 800 V (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

P = 1kW			Losses (W)			Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 163	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	DF160R12W2H3F_B11	Booster	22.6	0.7	0.5	Si-IGBT Baseline
Infineon	IM828	3 phase HB	20.2	0.1	0.1	
Infineon	FS55MR12W1M1H_B11	3 phase HB	11.8	0.2	0.1	
Infineon	DF23MR12W1M1_B11	Booster	7.3	0.9	0.6	Selected Module

P = 2,5kW			Losses (W)			Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 163	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	DF160R12W2H3F_B11	Booster	65.5	2.2	1.5	Si-IGBT Baseline
Infineon	IM828	3 phase HB	56.5	0.7	0.4	
Infineon	FS55MR12W1M1H_B11	3 phase HB	38.5	1.4	0.8	
Infineon	DF23MR12W1M1_B11	Booster	28.9	2.6	1.9	Selected Module

P = 5kW			Losses (W)			Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 163	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	DF160R12W2H3F_B11	Booster	157.6	4.9	3.4	Si-IGBT Baseline
Infineon	IM828	3 phase HB	134.9	2.9	1.7	
Infineon	FS55MR12W1M1H_B11	3 phase HB	131.9	4.3	2.8	
Infineon	DF23MR12W1M1_B11	Booster	101	5.9	4.2	Selected Module



Tabelle 4: Simulierte Verluste verschiedener SiC Leistungsschaltermodule und Vergleich mit dem Si-basierten Leistungsmodul des Referenzwechselrichters für den NPC-Inverter bei 1 kW, 2.5 kW und 5 kW und bei verschiedenen DC-Linkspannungen von 595 V und 800 V. (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

P = 1kW			Losses (W)		Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	FS3L50R07W2H3F_B11	3 level 3 phase	9.5	26.3	Si-IGBT Baseline
Microchip	MSCSM70TLM44C3AG	3 level 1 phase	4.8	6.9	Selected Module

P = 2,5kW			Losses (W)		Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	FS3L50R07W2H3F_B11	3 level 3 phase	28.6	65.6	Si-IGBT Baseline
Microchip	MSCSM70TLM44C3AG	3 level 1 phase	14.9	20.4	Selected Module

P = 5kW			Losses (W)		Comments
Manufacturer	Device	Topology	V _{pv} = 595	V _{pv} = 800	
Infineon	FS3L50R07W2H3F_B11	3 level 3 phase	67.4	139	Si-IGBT Baseline
Microchip	MSCSM70TLM44C3AG	3 level 1 phase	32.4	41.1	Selected Module

Boost-Konverter: Das Modul «DF23MR12W1M1_B11» ist bei 163 V (der Spannung, bei der der Boost-Konverter bei den Messungen aktiv ist) am effizientesten. Bei 595 V und 800 V ist das Modul weniger effizient, was auf die erhöhten Durchgangsverluste der Bypass-Diode zurückzuführen ist.

NPC-Inverter: Der Wirkungsgrade des SiC-Moduls für den NPC-Inverter wurden mit dem des Si-IGBT-Moduls bei verschiedenen Leistungsstufen und bei den beiden DC-Linkspannungen (595 V und 800 V) verglichen. Das SiC-Modul ist bei allen getesteten Betriebsbedingungen deutlich effizienter. Darüber hinaus war das «MSCSM70TLM44C3AG» das einzige auf dem Markt erhältliche 3-Level-Modul mit der gleichen Topologie wie das «FS3L50R07W2H3F_B11» bei ähnlichen Leistungsdaten.



4.3 Simulativer Vergleich Si-basierter & SiC-basierter Wechselrichter

Nach der Auswahl der Halbleitermodule wurde ein erster simulativer Vergleich der beiden Konverter des Si-basierten PV-Wechselrichters und des SiC-basierten PV-Wechselrichters erstellt. Die Verluste in den Halbleitern und den Induktivitäten wurden berücksichtigt und bei 1 kW, 2.5 kW und 5 kW ermittelt. Die Eingangsspannungen des PV-Konverters sind 163 V, 595 V und 800 V, die für den NPC-Inverter relevanten DC-Link Spannungen 595 V und 800 V.

Die Halbleiterverluste des Boost-Konverters sind in Tabelle 5 aufgeführt. Dabei ist bei einer Eingangsspannung von 163 V der Boost-Konverter selbst aktiv und generiert 595 V am Zwischenkreis (Boost-Konverter Ausgang), wodurch relativ hohe Verluste entstehen. Bei höheren Spannungen entstehen lediglich geringe Verluste durch die Bypass-Dioden (beide SiC). Weitere signifikante Verluste stammen im Boost-Betrieb von den Induktivitäten (Tabelle 6), wobei keine Unterschiede der Verluste durch unterschiedliche Halbleiter festgestellt wurden. Die Halbleiterverluste des NPC-Konverters sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Verluste des DC-Links sind in Tabelle 8 dargestellt und werden durch den Stromripple der Konverter im ESR erzeugt. Dieser ist besonders bei Betrieb des Boost-Konverters hoch. Unterschiede durch die Halbleiter sind wie auch bei den Boostinduktivitäten kaum festzustellen. Die Unterschiede bei den Gesamtverlusten (Tabelle 9) stammen daher fast ausschliesslich von den Unterschieden der Halbleiter. Insgesamt betrachtet sind SiC-Module deutlich effizienter als die Si-Module und resultieren in einer um 1.8 % - 2.1 % höherer Effizienz bei Boost-Betrieb und 0.3 % - 0.6 % höherer Effizienz ohne Boost-Betrieb. Im Vergleich zu den Messungen am Referenzwechselrichter zeigt sich jedoch auch, dass noch weitere Verluste im Konverter auftreten, sodass die Simulationen noch zu optimistisch sind.

Tabelle 5: Simulierte Verluste des Boost-Konverters für Si und SiC ohne Verluste der Induktivität bei einer Eingangsleistung von 1, 2.5 und 5 kW.

Verluste [W]	V _{pv} = 163 V			V _{pv} = 595 V			V _{pv} = 800 V			
Eingangsleistung	1000	2500	5000	1000	2500	5000	1000	2500	5000	
Infineon DF160R12W2H3F_B11	22	50.9	101.2	1.1	3.6	8.8	0.8	2.4	5.4	IGBT Baseline
Infineon DF23MR12W1M1_B11	4.8	14.5	32.3	0.8	2.1	4.8	0.6	1.5	3.5	SiC Modul

Tabelle 6: Simulierte Verluste der Boost-Konverter Induktivität

Verluste [W]	V _{pv} = 163 V			V _{pv} ≥ 595 V
Eingangsleistung	1 kW	2.5 kW	5 kW	beliebig
Boostinduktivitäts- verluste	18.2	21.2	32.0	0



Tabelle 7: Simulierte Gesamtverluste des NPC-Konverters bei den zwei Eingangsspannungen des Konverters (DC-Link-Spannungen)

		Verluste @ 1 kW (W)		Verluste @ 2.5 kW (W)		Verluste @ 5 kW (W)	
	Topologie	Vpv 595 V	Vpv 800 V	Vpv 595 V	Vpv 800 V	Vpv 595 V	Vpv 800 V
IGBT	NPC	10.9	13.0	29.6	34.6	70.0	79.9
SiC	NPC	7.8	9.9	20.1	25.6	45.3	54.0

Tabelle 8: Simulierte Gesamtverluste im DC-Link bei verschiedenen Halbleitern und Spannungen

PV Spannung	Verluste (W)	Eingangsleistung 1 kW	Eingangsleistung 2.5 kW	Eingangsleistung 5 kW
163 V	IGBT	0.54	2.04	8.21
	SiC	0.53	2.04	8.23
595 V	IGBT	0.05	0.27	1.05
	SiC	0.03	0.17	0.67
800 V	IGBT	0.11	0.65	2.56
	SiC	0.08	0.52	2.06

Tabelle 9: Simulierte Gesamtverluste (Halbleiterverluste, Boostinduktivitätsverluste und DC-Link-Verluste)

PV Spannung		Eingangsleistung 1 kW	Eingangsleistung 2.5 kW	Eingangsleistung 5 kW
163 V	Si-Datenblatt	92.0 %	95.0 %	95.0 %
	Si-Messungen ohne Filter	94.35 %	95.74 %	95.28 %
	Si Simulation	94.8 %	95.9 %	95.8 %
	SiC Simulation	96.9 %	97.7 %	97.6 %
595 V	Si-Datenblatt	93.5 %	97.6 %	98.0 %
	Si-Messungen ohne Filter	97.57 %	98.36 %	98.04 %
	Si Simulation	98.8 %	98.7 %	98.4 %
	SiC Simulation	99.1 %	99.1 %	99.0 %
800 V	Si-Datenblatt	96.6 %	96.8 %	97.5 %
	Si-Messungen ohne Filter	96.05 %	97.69 %	97.73 %
	Si Simulation	98.6%	98.5%	98.2%
	SiC Simulation	98.9%	98.9%	98.8%



In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Verlustanteile bei maximaler Leistung (5 kW) und 163 V bzw. 800 V für das Gesamtsystem dargestellt. SiC-Module im Boost-Konverter sind bei 163 V ca. 66 % effizienter, während sie im NPC-Inverter immerhin 50 % effizienter sind. Bei 800 V haben die SiC Module im NPC-Inverter nur etwa 60 % der Verluste der Si-Module.

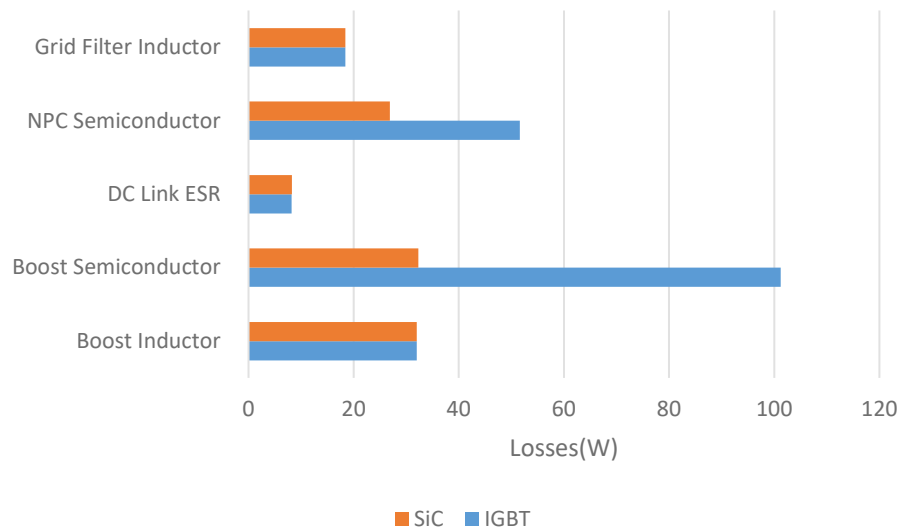


Abbildung 7: Simulierte Gesamtverluste bei 163 V und 5 kW (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

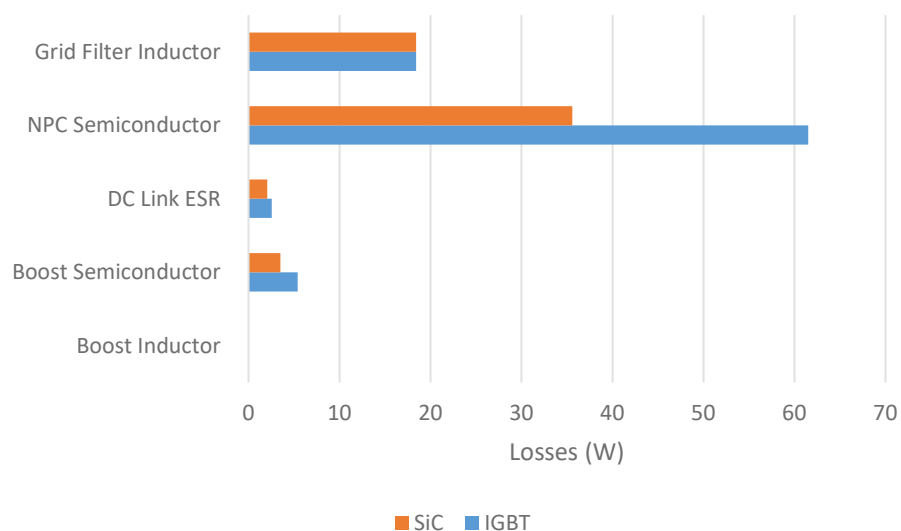


Abbildung 8: Simulierte Gesamtverluste bei 800 V und 5 kW (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)



4.4 Design und Umsetzung eines SiC-basierten PV Wechselrichters

Nach der Auswahl der SiC-Module und der Simulation der beiden PV-Wechselrichter wurde ein SiC-basierter Wechselrichter durch das AIT aufgebaut (Abbildung 9 und Abbildung 10). Der Prototyp nutzt zwei SiC-Module «DF23MR12W1M1_B11» für die Boost-Konverter und 3 Module «MSCSM70TLM44C3AG» für den 3-Level NPC. Um nur den Unterschied zwischen der Konvertereffizienz durch Si-Module und SiC-Module zu vergleichen, wurden die DC-Link Kapazitäten, die Induktivitäten der Konverter sowie die Filterkapazitäten und -induktivitäten eines baugleichen Si-basierten Referenzkonverters wiederverwendet. Somit verwenden die beiden Wechselrichter die gleichen passiven leistungselektronischen Komponenten und nur die zu vergleichenden Halbleitermodule unterscheiden sich in der Leistungselektronik.

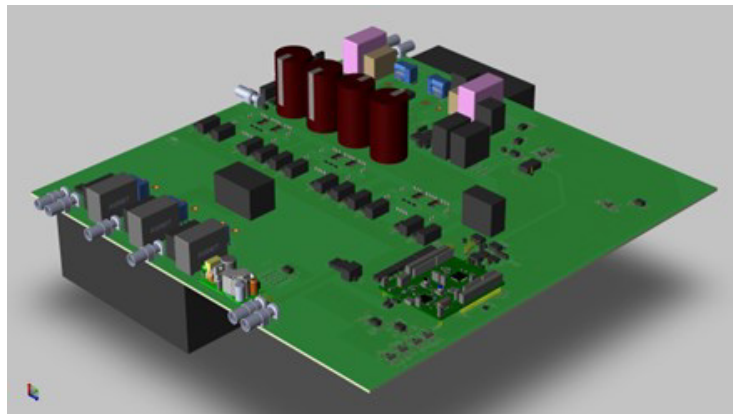


Abbildung 9: 3D-Entwurf des SiC-basierenden Wechselrichters des AIT (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

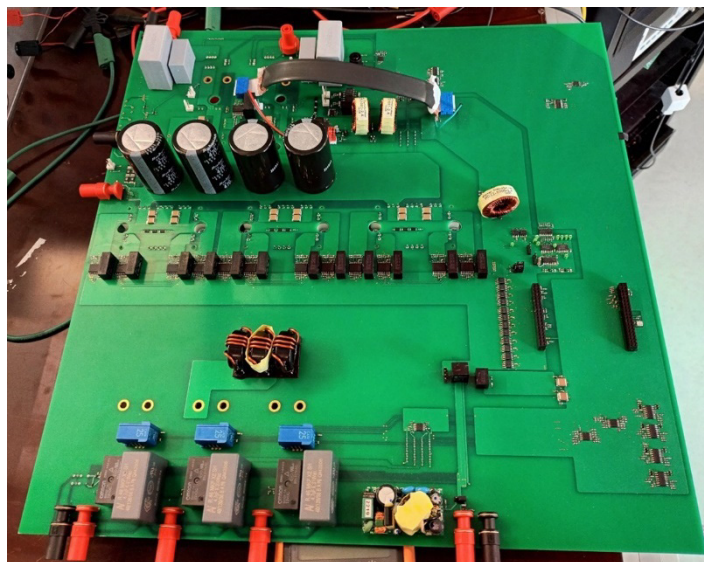


Abbildung 10: Foto des SiC-basierenden Wechselrichters des AIT (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

Die Signalelektronik des SiC-basierten Wechselrichter wurden teilweise neu entwickelt. Der neue SiC-basierte Wechselrichter verwendet die gleichen LEM-Stromsensoren wie der Si-basierte PV-Wechselrichter. Der Sensor «CKSR 50-NP» wird für die Eingangsstrommessung der Boost-Konverter verwendet und «CASR 25-NP» wird für Messung der Ströme in den Netzphasen verwendet. Anstelle



der individuellen ADCs, des FPGAs und des Microcontrollers des Referenzdesigns wird das Development-Board «NUCLEO-G474RE» von STM verwendet. Der Grund für den Wechsel war die Annahme, dass eine deutlich einfachere Implementierung durch die Nutzung eines einzelnen steuernden Elements und der Wegfall der individuellen ADC Wandler auf dem PCB (da der Microcontroller interne ADCs verwendet) möglich ist. Ermöglicht wurde dies durch die deutlich geringeren Anforderungen an den Betrieb des neuen Wechselrichters, welcher nur die Fälle der Wirkungsgradmessungen abdecken sollte. Somit wurde auch kein MPPT, keine Spannungsregelung am PV-Eingang, keine unabhängigen PV-Eingänge und keine hohe Regeldynamik benötigt. Als Gate-Treiber wurden EiceDrivers «1ED332x» von Infineon eingesetzt.

Die Schnittstellen zwischen dem neuen PCB und dem Microcontroller wurden zwischen AIT und ZHAW bilateral abgestimmt.



4.5 Regelung des SiC-basierten PV Wechselrichters

Die Regelung des vom AIT aufgebauten SiC-basierten Wechselrichters wurde an der ZHAW in Simulink ausgelegt und mit dem Softwaretool PLECS aufgebaut und simuliert. Dabei wurde wie in Abbildung 11 gezeigt, eine Simulation bestehend aus NPC-Konverter, zwei Boost-Konvertern und der Regelung aufgebaut. Das Regelungsuntersystem uC-Control wurde dabei mit dem Ziel entwickelt, direkt mit Code Generation auf den uC programmiert zu werden. Alle Schnittstellen dieses Untersystems wurden mit PLECS-Blöcken aufgebaut, die bei der Code-Generation als Interface zur Hardware dienen und gleichzeitig bei Simulationen in PLECS das entsprechende Verhalten zu den simulierten Konvertern zeigen, wodurch die Regelung direkt mit Simulationen überprüft werden konnte.

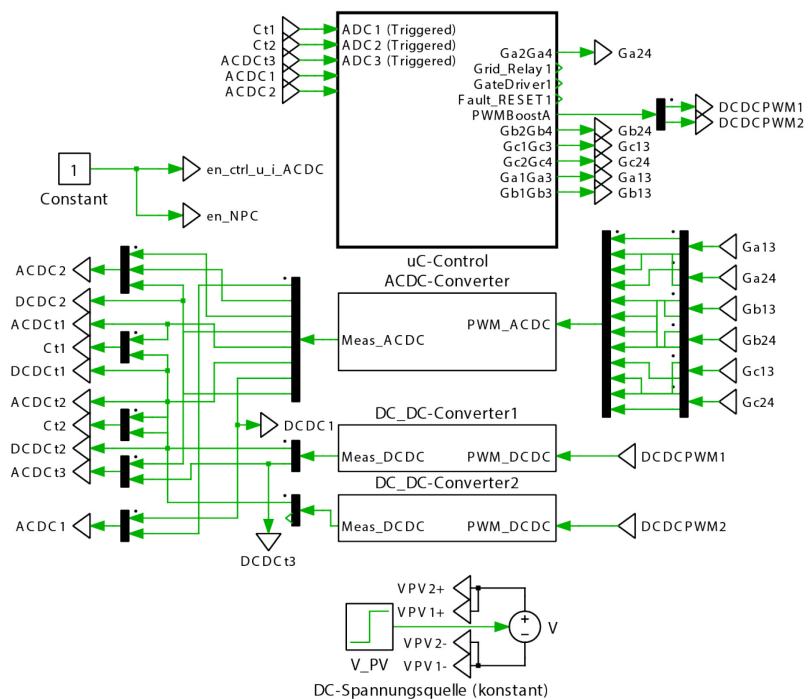


Abbildung 11: Top-Level der PLECS-Simulation mit NPC-Konverter, zwei Boost-Konvertern und der Regelung (uC-Control) als Untersystem, welches direkt mit Code Generation auf den uC programmiert werden kann.

In Abbildung 12 ist das Untersystem uC-Control dargestellt. Mit der Schnittstelle HRTIM wurde das PWM des NPC-Konverters erzeugt, bei welchem ein Master die Zeit vorgab und auch die zugehörigen ADC-Messungen triggerte. Sowohl HRTIM als auch ADC waren Teile des Prozesses PWM mit einer Regelfrequenz von 20 kHz, mit welcher auch die Regelung des ACDC Konverters (NPC-Konverter) getaktet wurde. Die PWM des Boost-Konverters und die zugehörigen Messungen nutzten eine Regelfrequenz von 40 kHz, da die beiden Konverter interleaved arbeiten und daher die Strommessungen zweimal pro Schaltperiode der Konverter ausgeführt werden muss. Für die PWM-Generierung wurde ein symmetrischer Carrier verwendet, sodass immer zum gleichen Zeitpunkt (halbe Einschaltzeitdauer der Schalter) der Strom gemessen werden konnte. Der Prozess DCDC mit DCDC-Regler und übergeordneter Regelung arbeitete mit 2 kHz, um die Ressourcen des uC zu schonen.

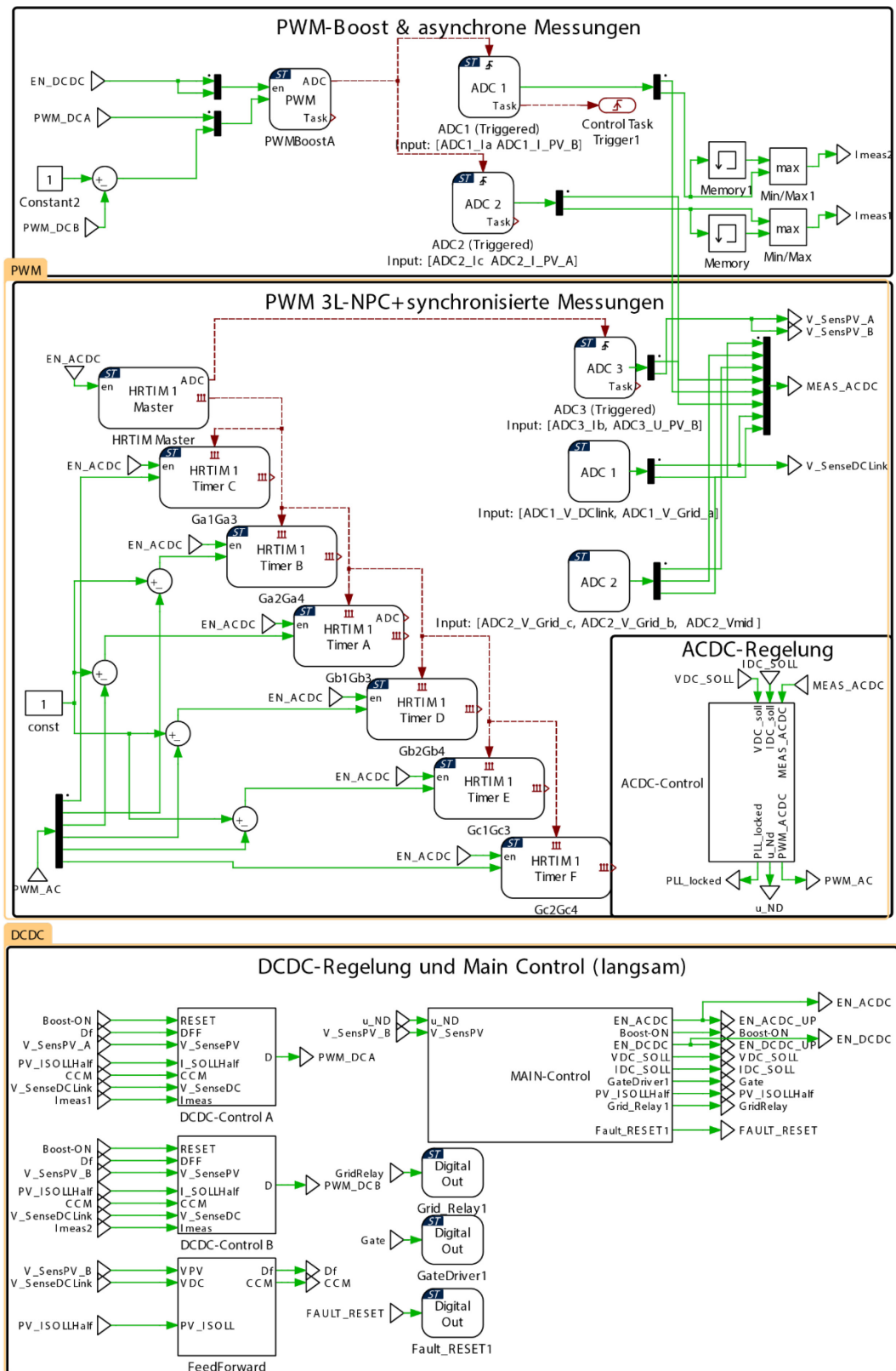


Abbildung 12: Untersystem uC-Control mit den einzelnen Reglerblöcken für die ACDC-Regelung, DCDC-Regelung, den Schnittstellen zur Hardware und der übergeordneten Steuerung (Main-Control) mit State-Machine und HMI.



Wie bei den Messungen am Referenzkonverter, sollte eine konstante Spannung an den verbundenen PV-Eingänge angelegt werden. Somit musste keine Spannungsregelung an den PV-Eingängen, wie es mit einem MPPT üblich wäre, implementiert werden. Durch die Bypass-Diode, die bei Eingangsspannungen grösser oder gleich 595 V verwendet werden, benötigte der PV-Wechselrichter bei diesen Spannungen auch für die DC-Link Spannung keine Regelung. Lediglich für Eingangsspannung kleiner als 595 V musste ein Regler für die DC-Link Spannung erstellt werden, mit welcher der NPC-Konverter diese auf 595 V regeln kann.

Für die Stromregelung wurde die Eingangssollleistung als Betriebsparameter in die Regelung implementiert. Bei Eingangsspannungen über 595 V, kann mit der Eingangssollleistung über die Netzspannung der Soll-d-Anteil des Stromes berechnet werden. Dieser wurde als Stromsollwert für den NPC-Konverter verwendet. Bei Eingangsspannungen unter 595 V kann mit der Eingangssollleistung über die PV-Eingangsspannung der Stromsollwert am Eingang berechnet werden. Der halbe Stromsollwert am Eingang wurde in diesem Fall als Stromsollwert am Eingang eines einzelnen der beiden Boost-Konverter verwendet. Der Stromsollwert des 3-Level NPC-Konverters wurde in diesem Betriebsfall (< 595 V) durch den DC-Link Spannungsregler vorgegeben, sodass ein kaskadierter Regler verwendet wurde.

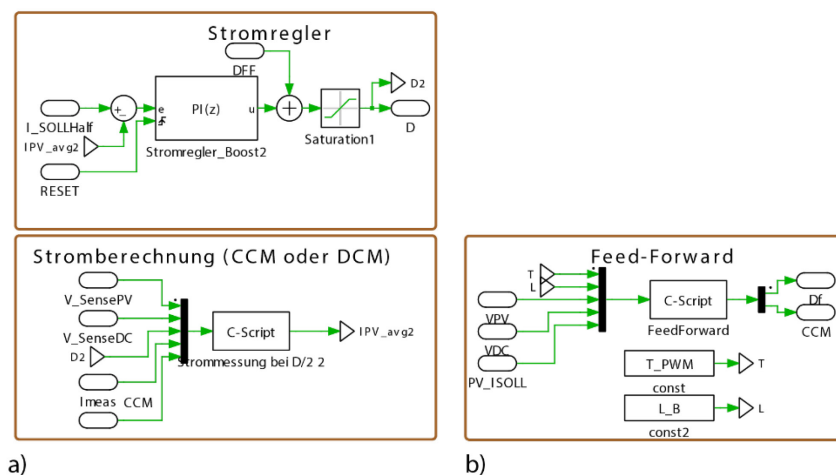


Abbildung 13: DCDC-Regler des Boost-Konverters mit Stromregler (PI) und Berechnung des Stromes aus der Strommessung (a) als Untersysteme DCDC-Contol A und DCDC-Contol B für jeweils einen Boost-Konverter und Feed-Forward Berechnung des Duty Cycles (b) für beide Konverter.

Der Stromregler des Boost-Konverters (Abbildung 13) besteht aus der Berechnung des Duty Cycles über den Sollwert und einem PI-Regler. Regelparmeter wurden in Simulink für den zeitdiskreten Regler mittels der Tune-Funktion bestimmt. Da der Strom immer nach der halben Einschaltzeitdauer gemessen wurde, musste der gemessene Strom zusätzlich beim Discontinuous Conduction Mode um einen vom Duty Cycle anhängigen Faktor korrigiert werden.

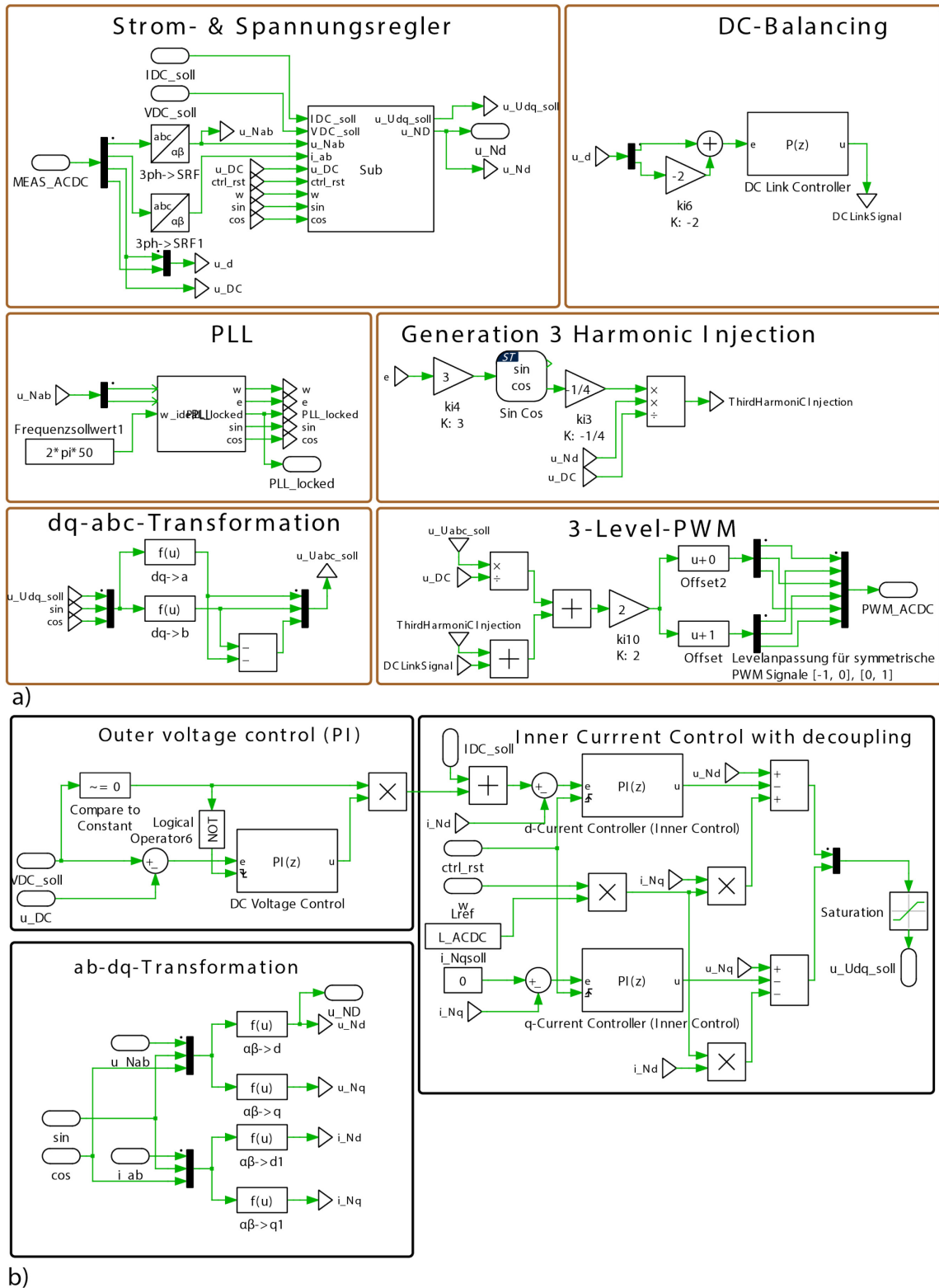


Abbildung 14: a) ACDC-Regelung des NPC-Konverters mit Detailansicht des Strom- und Spannungsreglers (b)



Die Regelung des 3-Level NPC-Konverters ist in Abbildung 14 gezeigt. Eine PLL wurde zur Netzsynchronisierung verwendet und im kaskadierten Strom- und Spannungsregler (Abbildung 14b) zur Transformation der Netzspannungen und Ströme in das dq-System verwendet. Für die DC-Link-Spannung wurde ein PI-Regler implementiert, welcher in Simulink mittels der Tune-Funktion ausgelegt wurde. Der d-Stromregler und der q-Stromregler sind wie üblich entkoppelt implementiert worden. Die Auslegung der PI-Regler wurde analog zum Boost-Konverter in Simulink ausgeführt. Zur Erzeugung der Schaltsignale wurden die Spannungssollwerte des Konverters zurücktransformiert, mit dem Signal des DC-Link Reglers und einer dritten harmonischen überlagert und mit einem 3-level PWM in Schaltsignale umgewandelt.

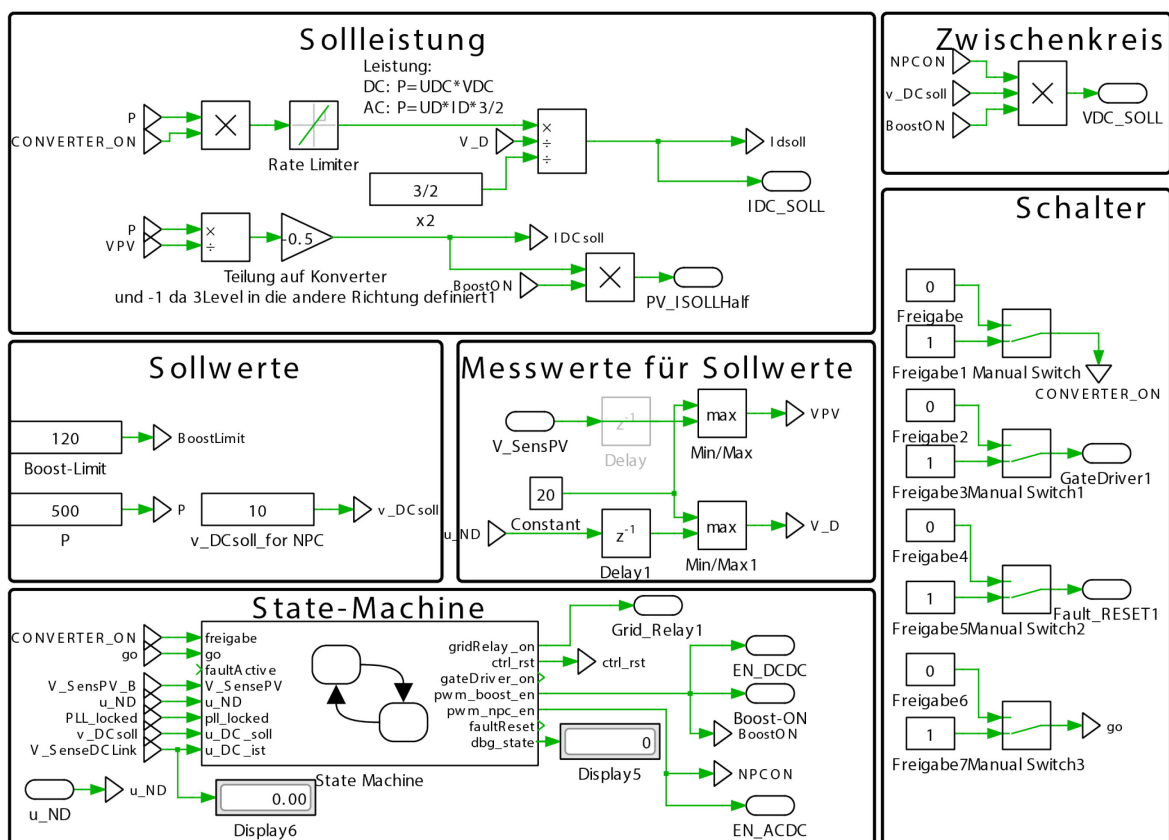


Abbildung 15: Übergeordnete Regelung des uC mit State-Machine und HMI (Schalter und Sollwerte) und zugehörigen Berechnungen.

Zur Ansteuerung des Konverters im Betrieb wurde eine State-Machine und eine Art HMI in der Regelung implementiert (Abbildung 15). Nach der Programmierung des uC mit dem Coder, können durch die Verbindung zu PLECS im Interface der Simulationssoftware Sollwerte im Regler wie die Eingangsleistung oder die Zustände von Signalen zur Ansteuerung des Systems geändert werden. So konnte PLECS als HMI für die Steuerung des Konverters im Testbetrieb verwendet werden.



4.6 Wirkungsgradmessungen des SiC-basierten Wechselrichters und Vergleich

Ziel war nun die in Kap. 4.3 simulierten Verluste messtechnisch mit dem Hardwareaufbau zu verifizieren. Der in Kapitel 4.4 beschriebene am AIT neu entwickelte SiC-PV basierte PV-Wechselrichter sollte mit der in Kapitel 4.5 beschriebenen an der ZHAW entwickelten Regelung in Betrieb genommen werden. Durch die geringe verbliebene Projektzeit und Problemen bei der Inbetriebnahme waren ausführlichen Messungen zur Bestimmung des Wirkungsgrades wie in Kapitel 4.1 nicht mehr möglich. Die primären Probleme in der Inbetriebnahme waren zunächst die hohe Auslastung des uC und die nötigen, vom Coder zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgedeckten, Funktionen des HRTIM. Nachfolgende Probleme beim zeitgleichen Betrieb des Boost- und des NPC-Konverters mit der Regelung, führten anschliessend zu einer Änderung der Strategie.

Das AIT nahm die beiden Konverterstufen des SiC-basierten PV-Wechselrichter einzeln und gesteuert in Betrieb und die ZHAW führte vergleichbare Messungen, d.h. bei gleichen Spannungen und Leistungen am Referenzwechselrichter durch.

Der verwendete Messaufbau der Boost-Konverterstufe ist in Abbildung 16 dargestellt. Als Eingangsspannung wurde eine DC-Quelle mit 163 V angeschlossen. Zusätzliche Filter wurden am Eingang eingefügt, um einen konstanten DC-Strom aus der Quelle zu beziehen. Die PWM Signale wurden gesteuert mit einer PLECS RTBox erzeugt.

Der verwendete Messaufbau der NPC-Konverterstufe ist in Abbildung 16 sowie in Abbildung 17 dargestellt. Als Versorgung wurde eine DC-Quelle an den DC-Link angeschlossen. Es wurden zusätzliche Filter am Eingang eingefügt, um einen konstanten DC-Strom aus der Quelle zu beziehen. Die PWM Signale wurden gesteuert mit einer PLECS RTBox erzeugt. Widerstände wurden anstelle des Netzes als Senke verwendet.

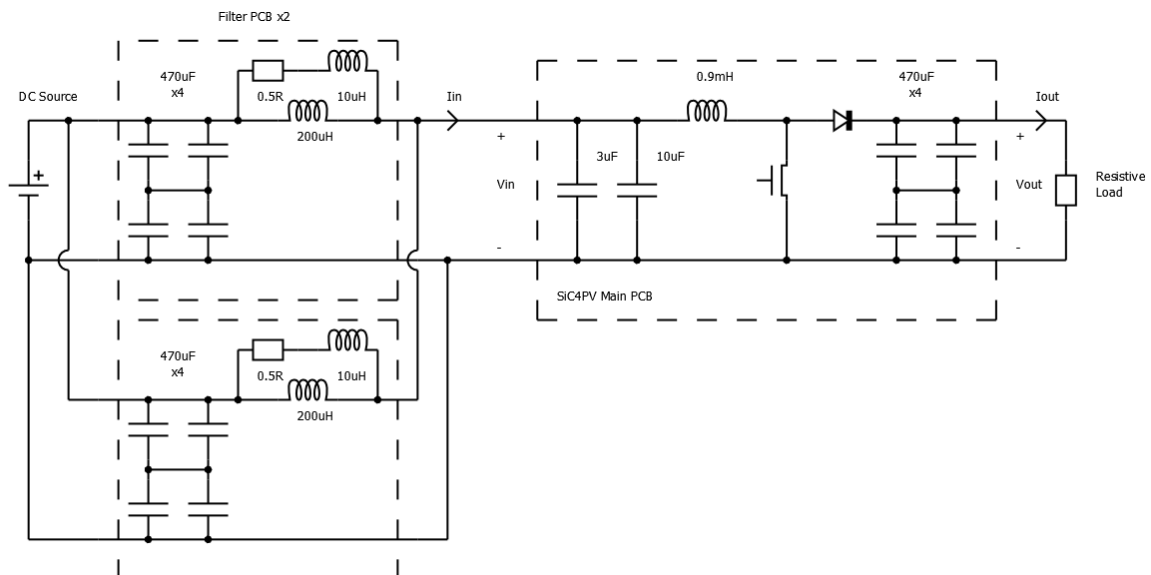


Abbildung 16: Messaufbau des AIT zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Boost-Stufe mit 163 V Eingangsspannung des SiC-basierten PV-Wechselrichters (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

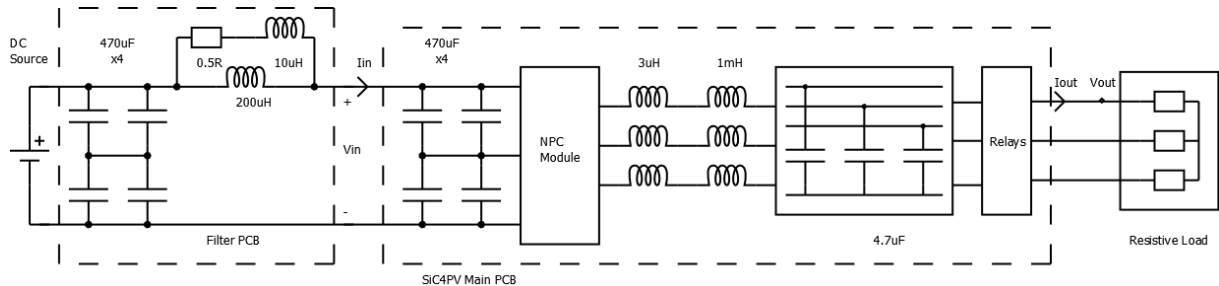


Abbildung 17: Messaufbau des AIT zur Bestimmung des Wirkungsgrades der NPC-Stufe des SiC basierten PV-Wechselrichters (Quelle: © Makoschitz & Eskilson AIT 2023)

Die Messergebnisse der beiden Konverterstufen des bei der ZHAW ausgemessenen Si-basierten PV-Referenzwechselrichters und des neu entwickelten am AIT ausgemessenen SiC-basierten PV-Wechselrichters sind in den Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführt und in Abbildung 18 und Abbildung 19 gegenübergestellt. Bei der Boost-Konverterstufe ist hierbei die Effizienz des neuen PV-Wechselrichters 1.39 % - 1.56 % höher als die Effizienz des Referenzwechselrichters. Die Effizienz der NPC-Konverterstufe ist um 1.08 % - 2 % höher. Somit resultiert eine Effizienzsteigerung von 1.47-3.56% für das Gesamtsystem.

Tabelle 10: Effizienzvergleich Inverter 1 und AIT SIC4PV Boost Konverter Stufe

	Si-basierter Boost Referenzkonverter				SiC-basierter Boost Konverter			
Vin (V)	162.34	162.35	162.36	162.40	163.178	162.605	162.245	161.34
Vout,rms (Vrms)	593.93	594.28	596.30	602.12	604.56	601.376	598.222	592.79
Pin (W)	713.01	1294.69	2543.24	3747.51	713.25	1294.82	2544.98	3748.57
Pout (W)	684.07	1252.33	2474.17	3641.63	695.39	1270.74	2511.16	3698.86
Effizienz	0.9594	0.9673	0.9728	0.9717	0.9750	0.9814	0.9867	0.9867
Pout/Prated	0.1368	0.2505	0.4948	0.7283	0.1391	0.2541	0.5022	0.7398

Tabelle 11: Effizienzvergleich Inverter 1 und AIT SIC4PV NPC-Konverter Stufe

	Si-basierter NPC Referenzkonverter				SiC-basierter NPC Konverter			
Vin (V)	599.34	799.80	799.85	718.98	600.067	800.8	799.353	719.04
Vout,rms (Vrms)	172.44	230.58	231.05	207.38	172	230	230	206
Pin (W)	1028.70	1824.84	3567.63	4328.11	1031.24	1822.73	3562.97	4325.62
Pout (W)	994.53	1778.72	3494.97	4238.64	1017.6	1798.9	3528.9	4283.5
Effizienz	0.9668	0.9747	0.9796	0.9793	0.9868	0.9869	0.9904	0.9903
Pout/Prated	0.1989	0.3557	0.6990	0.8477	0.2035	0.3598	0.7058	0.8567

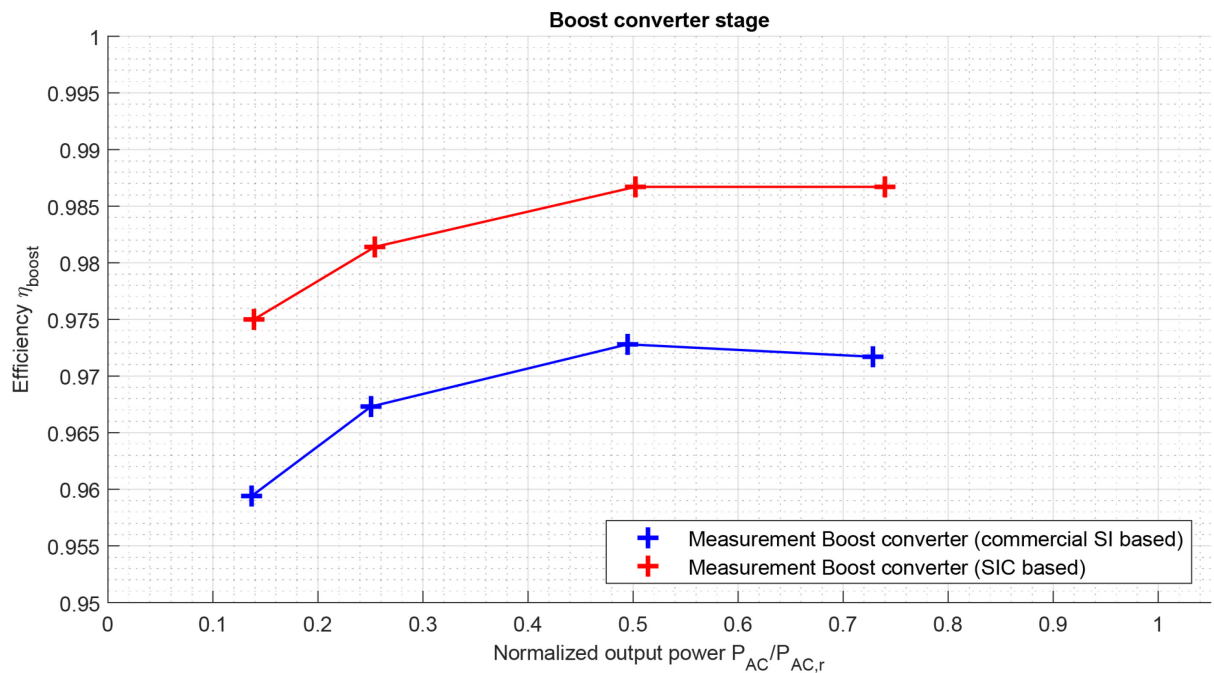


Abbildung 18: Vergleich des Wirkungsgradverlauf (η'') der Boost-Stufe des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters und des SiC-basierten PV-Wechselrichters ohne PV-Eingangsfiler.

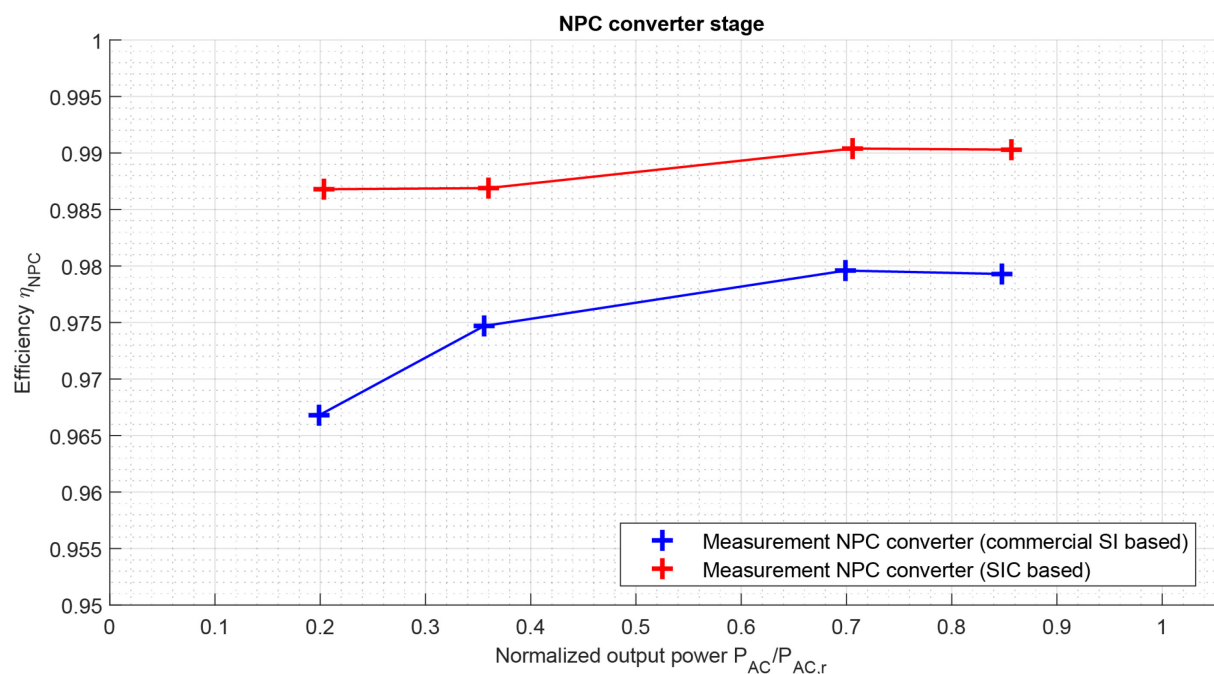


Abbildung 19: Vergleich des Wirkungsgradverlauf (η'') der NPC-Stufe des kommerziellen Si-basierten Wechselrichters und des SiC-basierten PV-Wechselrichters ohne Netzfilter.

Neben den gemessenen Konverterverlusten der einzelnen Stufen wurden vom AIT Abschätzungen bezüglich der für die Hilfsversorgung nötigen Energie und der Verluste in den Filtern durchgeführt (aber



nicht zu den direkt gemessenen Konverterverlusten in Tabelle 10 & Tabelle 11, bzw. der Abbildung 18 und Abbildung 19 addiert).

Beim Referenzwechselrichter wurden durch Messungen eine Leistung von 13.44 W für die Kühlung und die Relais bestimmt. Der weitere Verbrauch für die Regelung, Messkreise und Schalteransteuerungen sind jedoch unbekannt. Bei dem neu entwickelten SiC-basierten PV-Wechselrichter benötigt die Hilfsversorgung 18 W, wobei diese nicht den von der PLECS-Box simulierten uC beinhaltet. Für den SiC-basierten PV-Wechselrichter wurden ausserdem die Verluste in den Eingangs- und Ausgangsfiltern bestimmt. Mit den ausgemessenen Charakteristiken der Filter und den gemessenen Strömen wurden maximale Verluste von 7.8 W im Netzfilter und 10.7 W im PV-Filter bei 5 kW Leistung berechnet.

Mit den bei unterschiedlichen Leistungen gemessenen Konvertereffizienzen lässt sich in einem weiteren Schritt die Gesamteffizienz der Konvertersysteme bezogen auf ein Jahr berechnen. Dabei wird die vom Konverter an das Netz abgegebene Energie der vom PV-Modul an den Konverter abgegebenen Energie gegenübergestellt. Diese Rechnung bezieht die unterschiedliche Dauer und Stärke der Sonneneinstrahlung wie auch die von der Sonneneinstrahlung abhängigen PV-Eingangsspannung mit ein, entsprechend den üblichen Vorgaben der Standards nach EURO Effizienz. Die resultierende Effizienz ist somit auch abhängig vom Standort, und wird auch in den Datenblättern üblich für Europa und California angegeben. Die resultierende Effizienzsteigerung nach dem gewichteten EURO Wirkungsgrad des SiC-basierten PV-Wechselrichters gegenüber dem Si-basierten PV-Wechselrichter beträgt 2.66 % [9].

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Herausforderung beim Projektstart war die Wahl der Wechselrichterschaltungstopologie und damit verbunden die Auswahl des Referenzwechselrichters basierend auf Si-Leistungshalbleitern als Vergleichstechnologie. Eine detaillierte Produktrecherche für dreiphasige Wechselrichter unter verschiedenen Herstellern (SMA, Fronius, Huawei, etc.) gab weder Aufschluss auf die Schaltungstopologie noch auf welcher Technologie deren eingesetzten Halbleiterschalter basieren. Zudem gibt es auch in der Literatur keine Übersichten, die diese Thematik im Bereich von dreiphasigen Wechselrichtern im Leistungsbereich 5-10 kW abdecken. Aus diesem Grund wurde entschieden, ein Reverse Engineering an einem am Markt sehr erfolgreichen 5 kW Wechselrichter durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Analyse (Identifikation der Topologie, Funktionsweise, eingesetzte Halbleiter, technische Spezifikationen) inklusive ersten Messungen des Wirkungsgrades wurde in ein Factsheet verarbeitet, das intern unter den Projektpartner intensiv diskutiert wurde. Der zusätzliche Austausch mit externen Fachpersonen ergab, dass die verwendete 3-Level Topologie repräsentativ für den Stand der Technik in diesem Leistungsbereich ist und dass diese Topologie im weiteren Projektverlauf genutzt wird.

Bei der Messung des Wirkungsgrades des Referenzwechselrichters mussten Spannungs- und Strommessungen in den bestehenden Wechselrichter integriert werden. Die Messungen wurden schrittweise erweitert und verfeinert, um näher an den Boost-Konvertern und NPC-Inverter zu messen und somit deren Verlustleistung präziser zu quantifizieren. Insbesondere wurden störende Einflüsse auf die Konvertereffizienzmessungen durch das MPP-Tracking und den «Dynamic Peak Manager» identifiziert und durch die Deaktivierung dieser Funktionen die Qualität der Messergebnisse verbessert.

Basierend auf den Messergebnissen und den bei den Messungen gewonnenen Erkenntnissen über den PV-Wechselrichter wurde ein SiC-basierter Wechselrichter aufgebaut. Dieser verwendete abgesehen von den zu untersuchenden Halbleitermodulen alle passiven leistungselektronischen Komponenten des Si-basierten Wechselrichters, der als Referenz dient. Somit wird beim abschliessenden Vergleich des Wirkungsgrades der Einfluss von anderen Nebeneinflüssen auf ein Minimum reduziert. Gleichzeitig wurde eine Regelung entwickelt und simulativ getestet, die mittels automatischer Code-Generierung mit dem PLECS-Coder auf dem Microcontroller implementiert werden konnte.



Durch die geringe verbliebene Projektzeit und Problemen bei der Inbetriebnahme waren zum Projektende allerdings keine ausführlichen Messungen zur Bestimmung des Wirkungsgrades mehr möglich und führten zu einer Änderung der Strategie. Die Vermessung des SiC-basierten PV-Wechselrichters wurde einzeln und gesteuert ausgeführt. Die aus diesen Messungen resultierenden Effizienzen wurden dann für die Teilkomponenten mit entsprechenden Messungen des Si-basierten PV-Wechselrichters verglichen. Die ermittelte Effizienz der Boost-Konverterstufe ist hierbei beim neuen PV-Wechselrichters um 1.39 % - 1.56 % höher als die Effizienz des Referenzwechselrichters. Die Effizienz der NPC-Konverterstufe ist um 1.08 % - 2 % höher. Dies entspricht einer prozentualen Reduktion der Konverterverluste von 38.4 % - 53 % bei der Eingangsstufe, bzw. 48 % - 60 % bei der Ausgangsstufe. Somit resultiert eine Effizienzsteigerung von 1.47-3.56% für das Gesamtsystem, bzw. bezogen auf die (in Österreich) jährlich abgegebene Leistung eine Effizienzsteigerung von 2.66%.

Abschliessend wurde mit dem Vergleich das Projektziel eines Vergleichs von Si-Halbleiterschaltern und SiC-Halbleiterschaltern erreicht, jedoch nicht im ursprünglich geplanten Umfang, da sich die Messungen und Inbetriebnahme als deutlich zeitaufwendiger als geplant herausstellten.

Weiterhin wurden die Ergebnisse als Publikation (siehe Kapitel 8) von AIT und ZHAW in einem gemeinsamen Paper an der EPE 2023 (25th. European Conference on Power Electronics and Applications) im Rahmen der PECTA-sessions veröffentlicht [10].



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Das Projekt zeigte die deutlich höhere Effizienz von SiC-Halbleiterschaltern im Vergleich zu herkömmlichen Si-Halbleiterschaltern bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen wie der Schaltfrequenz, den gleichen Filtern, gleichen Induktivitäten, gleichen Kapazitäten und gleicher Regelung. Somit konnten die Halbleiter direkt in diesem Betrieb verglichen werden. Dies entspricht jedoch nicht einem Vergleich der aus den SiC resultierenden Möglichkeiten, bzw. der mit SiC-Halbleiterschaltern maximal möglichen Effizienzsteigerung, denn die Rahmenbedingungen sind optimiert für den Si-Halbleiterschalter und andere Betriebsbedingungen sind möglicherweise optimaler für die SiC-Halbleiterschalter. Ein derartiger Vergleich müsste ein optimierter Aufbau beider Wechselrichter mit den gleichen Optimierungsmethoden und Optimierungszielen vorausgehen. Andererseits wären prinzipiell auch noch EMV-Messungen am im Projekt aufgebauten SiC-basierten PV-Wechselrichter nötig, da zu Projektende eigentlich unklar ist, ob dieser weiterhin die Normen erfüllen würde oder ob hierfür Filter mit höheren Verlusten nötig wären. Ein weiterer Punkt für zukünftige Projekte wäre der Vergleich mit GaN-Halbleiterschalter, die eine weitere Effizienzsteigerung ermöglichen könnten. Abschliessend wird vom Projektteam festgehalten, dass High Bandgap Bauelemente eine substantielle Wirkungsgradsteigerung in Zukunft ermöglichen werden und unverzichtbar für die Weiterentwicklung der Halbleitersysteme sind.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner AIT aus Österreich funktionierte reibungslos, abgesehen von externen Rahmenbedingungen in der zweiten Projektphase, wie aufenthaltsrechtlichen Unterbrechungen von Mitarbeitern, die von ausserhalb Europas nach Wien kamen, und daher zu Verzögerungen in der Designphase des Projekts zu Beginn führten. Dadurch mussten Projekte umgeschichtet werden, welches zur Folge hatte, dass die finalen Messungen verspätet ausgeführt werden können. Die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Arbeiten wurden gemeinsam definiert, sodass es bei den Schnittstellen von Hardware und Software keine Probleme gab. Auch die gemeinsame Erstellung einer Veröffentlichung und der intensive fachliche Austausch in den Projektmeetings war sehr erfolgreich.

8 Publikationen

T. Eskilson, A. Jehle, P. Schmidt, M. Makoschitz and F. Baumgartner, "Identifying the potential of SiC technology for PV inverters," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/EPE23ECCEEurope58414.2023.10264500

9 Literaturverzeichnis

- [1] ECPE, Roadmap Lead Applications for SiC and GaN, 2018
- [2] IEA 4E PECTA, Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map, 2020
- [3] IEA 4E PECTA, Energy saving potential of WBG-commercial power converters in different applications, 2023



- [4] Thomas Hostettler und Andreas Hekler, Statistik Sonnenenergie Referenzjahr 2022, Swissolar Juli 2023, https://www.swissolar.ch/03_angebot/news-und-medien/statistik-sonnenenergie/statistik_sonnenenergie_2022_bericht_de_final.pdf; see 2023 Swissolar PV production data, <https://www.swissolar.ch/de/news/detail/solarstrom-liefert-2024-10-des-schweizer-jahresverbrauchs-51518>
- [5] D. D. I. f. N. e. u. V. V. d. E. u. I. e.V., Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern; Deutsche Fassung EN 50530:2010 + A1:2013, 10772 Berlin, 2013.
- [6] B. -. B. S. BVES - BUNDESVERBAND ENERGIESPEICHER, Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme, 07/2019.
- [7] Bletterie et al., Redefinition of the European efficiency – Finding the compromise between simplicity and accuracy, 23. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVEC, Valencia, September 2008
- [8] F. Baumgartner, Skript Messunsicherheit 2019, ZHAW Winterthur, 2019.
- [9] M. Makoschitz , T. Eskilson , "FINAL PROJECT REPORT - SiC4PV", Energy Research Report, Bundesministerium, Wien, Dez 2023
- [10] T. Eskilson, A. Jehle, P. Schmidt, M. Makoschitz and F. Baumgartner, "Identifying the potential of SiC technology for PV inverters," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/EPE23ECCEEurope58414.2023.10264500

10 Anhang

10.1 Quellen und Messgeräte

10.1.1 Programmierbare bidirectional AC Quelle TC30.528.43-ACS-19031

Um eine konstante Netzspannung bei den Messungen zu garantieren, wurde eine programmierbare bidirektionale AC Quelle "TC30.ACS.30" von Regatron genutzt. Diese ist zwischen dem DUT und dem Netz geschaltet und erzeugt eine konstante Wechselspannung mit Amplitude 400 VAC. Die Charakteristiken sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Messmittel - bidirektionale AC-Quelle TCACS.30 Regatron

Typ	Seriennummer	Hersteller	Technische Eigenschaften
TC.ACS.30	AB-19-0786	Regatron	Input: 3 x 400 VAC, 3x48 A @ 400 VAC

10.1.2 PV Simulator TopCon Quadro

Zur Simulation einer an das System angeschlossenen Photovoltaikanlage wird der «TopCon Quadro» der Firma Regatron verwendet. Dieser erlaubt es unterschiedliche Leistungskurven abzufahren, um somit verschiedene Photovoltaik Konfigurationen und Zustände zu simulieren. Mithilfe des PV-Simulators wird der MPPT Wirkungsgrad des Systems bestimmt. Bei den aufgeführten Messungen wurde er als DC Quelle am PV-Eingang mit konstanter Spannung verwendet. Die Charakteristiken sind in Tabelle 13 aufgeführt.



Tabelle 13: Messmittel - PV Simulator TopCon Quadro Regatron

Typ	Seriennummer	Hersteller	Technische Eigenschaften
TopCon Quadro PV-Simulator	1542CC576	Regatron	Input: 3 x 400 VAC, 3 x 60 A Output: 0-32 kW, 0- 1000 V, 0-40 A Response Time: < 2 ms

10.1.3 Power Analyser Infratek 108A

Für die Erfassung der Leistung im Lastpfad PV2AC wird ein 6-kanaliger Power Analyser der Firma Infratek verwendet. Dieser erfasst die Messdaten auf allen Kanälen und speichert diese in definierbaren Intervallen ab. Die Charakteristiken sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Messmittel - Power Analyser Infratek 108A

Typ	Seriennummer	Hersteller	Technische Eigenschaften
Harmonic Power Analyzer – 108A	TAHEB1039852	Infratek	30 A Range / [Boost Konverter: Messpunkte 0.05 bis 0.5 (PAC/PAC,nom) bei UPVnom und UPVmax mit 5 A Messbereich erfasst]

10.1.4 Power Analyser N4L PPA5500

Eine zweite Messreihe wurde mit zwei 3-Kanal Power Analyser der Firma N4L durchgeführt. Diese erfassen ihre Messdaten auf allen Kanälen und speichern diese in definierbaren Intervallen ab. Die Charakteristiken sind in Tabelle 15 aufgeführt

Tabelle 15: Messmittel - Power Analyser N4L

Typ	Seriennummer	Hersteller	Technische Eigenschaften
Precision Power Analyser PPA5500	PA1: 165-05266 [30 A] PA2: 165-03039 [50 A]	Newtons4th Ltd	30 A bzw. 50 A Messbereich 0...1000 V Messanordnung: PA1: CH3 Zwischenkreis, CH1 PV-Eingang PA2: CH1 L1, CH2 L2, CH3 L3





10.2 Tabellarische Messergebnisse Si-basierter PV-Wechselrichter

Tabelle 16: Messungen bei minimaler PV- Eingangsspannung U_{min} (162 V)

Umin - ohne Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	87.14	91.60	94.18	94.75	95.09	95.71	95.70	95.28
Unsicherheit $\pm$	%	0.24	0.32	0.46	0.28	0.25	0.39	0.29	0.24
$\bar{U}_{PV}$	V	162.22	162.31	162.31	162.23	162.31	162.31	162.37	162.33
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	265.24	520.89	1024.95	1279.43	1531.62	2527.94	3759.54	4962.42
$\bar{P}_{AC}$	W	231.14	477.12	965.29	1212.30	1456.36	2419.51	3597.75	4728.40
η_{Boost}	%	93.18	94.78	96.18	96.00	96.07	97.01	98.13	98.61
Unsicherheit $\pm$	%	0.29	0.38	0.57	0.32	0.29	0.47	0.34	0.29
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	586.55	589.38	592.61	595.22	596.44	603.01	608.78	638.21
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	247.14	493.71	985.81	1228.29	1471.45	2452.29	3689.14	4893.44
η_{NPC}	%	93.53	96.64	97.92	98.70	98.97	98.66	97.52	96.63
Unsicherheit $\pm$	%	0.24	0.25	0.35	0.22	0.20	0.29	0.23	0.21

Umin - mit Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	81.96	88.81	92.59	93.45	93.99	94.94	95.04	94.62
Unsicherheit $\pm$	%	0.22	0.31	0.46	0.28	0.24	0.38	0.29	0.24
$\bar{U}_{PV}$	V	162.52	162.61	162.60	162.64	162.67	162.78	162.90	162.96
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	265.92	519.98	1026.11	1281.12	1533.85	2524.88	3761.74	4966.08
$\bar{P}_{AC}$	W	217.95	461.82	950.05	1197.25	1441.71	2397.15	3575.14	4698.72
η_{Boost}	%	93.13	94.75	96.03	95.88	95.93	96.63	97.50	96.83
Unsicherheit $\pm$	%	0.29	0.38	0.57	0.32	0.28	0.47	0.34	0.29
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	586.74	588.96	592.83	593.73	594.81	601.43	607.09	637.58
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	247.65	492.70	985.39	1228.34	1471.37	2439.73	3667.71	4808.53
η_{NPC}	%	88.01	93.73	96.41	97.47	97.98	98.25	97.48	97.72
Unsicherheit $\pm$	%	0.21	0.24	0.35	0.22	0.20	0.29	0.23	0.21

Umin - ohne Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	86.98	91.55	94.10	94.61	95.00	95.51	95.58	95.35
Unsicherheit $\pm$	%	0.33	0.26	0.13	0.21	0.15	0.13	0.13	0.25
$\bar{U}_{PV}$	V	162.59	162.49	162.52	162.51	162.51	162.49	162.48	162.54
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	259.96	523.63	1033.07	1275.97	1528.45	2525.87	3759.48	4958.53
$\bar{P}_{AC}$	W	226.11	479.37	972.10	1207.20	1452.05	2412.47	3593.22	4728.08
η_{Boost}	%	93.27	94.99	96.63	96.88	97.16	97.48	97.54	97.41
Unsicherheit $\pm$	%	0.29	0.20	0.19	0.21	0.29	0.12	0.13	0.17
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	587.55	589.38	590.53	591.87	591.69	594.41	597.47	620.01
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	242.45	497.40	998.27	1236.20	1485.03	2462.18	3666.90	4830.13
η_{NPC}	%	93.26	96.38	97.38	97.65	97.78	97.98	97.99	97.89
Unsicherheit $\pm$	%	0.41	0.24	0.21	0.15	0.29	0.14	0.14	0.23

Umin - mit Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	81.47	88.80	92.63	93.46	93.96	94.72	94.86	94.59
Unsicherheit $\pm$	%	0.36	0.22	0.16	0.34	0.15	0.14	0.13	0.21
$\bar{U}_{PV}$	V	162.78	162.84	162.92	162.93	162.94	162.98	163.07	163.13
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	258.53	521.97	1029.23	1280.94	1524.78	2524.74	3765.61	4947.48
$\bar{P}_{AC}$	W	210.61	463.51	953.43	1197.21	1432.72	2391.32	3571.90	4679.96
η_{Boost}	%	93.01	95.08	95.69	96.23	96.52	97.04	97.09	97.07
Unsicherheit $\pm$	%	0.30	0.16	0.16	0.66	0.13	0.17	0.18	0.15
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	588.23	590.44	591.05	592.37	592.15	594.80	596.60	618.20
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	240.46	496.28	984.86	1232.67	1471.75	2449.97	3656.21	4802.54
η_{NPC}	%	87.59	93.40	96.81	97.12	97.35	97.61	97.69	97.45
Unsicherheit $\pm$	%	0.41	0.22	0.14	0.58	0.13	0.19	0.19	0.21

Tabelle 17: Messungen bei nominaler PV- Eingangsspannung U_{nom} (595 V)

Unom - ohne Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	93.01	96.15	97.57	97.94	98.14	98.36	98.41	98.04
Unsicherheit $\pm$	%	0.40	0.34	0.35	0.30	0.26	0.19	0.29	0.19
$\bar{U}_{PV}$	V	595.02	595.13	595.25	595.34	595.49	595.64	595.83	595.45
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	267.62	525.05	1039.96	1285.22	1552.96	2579.54	3841.92	5141.83
$\bar{P}_{AC}$	W	248.92	504.85	1014.74	1258.81	1524.00	2537.31	3780.73	5040.92
η_{Boost}	%	99.50	99.70	99.70	99.81	99.77	99.78	99.83	99.78
Unsicherheit $\pm$	%	0.45	0.40	0.48	0.40	0.34	0.24	0.39	0.24
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	594.18	594.27	594.44	594.53	594.68	594.96	595.22	594.23
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	266.29	523.46	1036.80	1282.78	1549.35	2573.97	3835.31	5130.72
η_{NPC}	%	93.48	96.45	97.87	98.13	98.36	98.58	98.58	98.25
Unsicherheit $\pm$	%	0.41	0.35	0.35	0.30	0.26	0.19	0.29	0.19
Unom - mit Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	88.01	93.50	96.27	96.87	97.24	97.83	98.10	97.68
Unsicherheit $\pm$	%	0.49	0.30	0.34	0.31	0.26	0.19	0.29	0.19
$\bar{U}_{PV}$	V	595.05	595.11	595.27	595.31	595.39	595.53	595.76	595.40
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	270.99	522.18	1044.07	1281.38	1556.48	2582.65	3840.96	5142.49
$\bar{P}_{AC}$	W	238.50	488.24	1005.11	1241.30	1513.45	2526.71	3768.05	5023.34
η_{Boost}	%	99.24	99.56	99.62	99.74	99.73	99.77	99.81	99.80
Unsicherheit $\pm$	%	0.55	0.37	0.47	0.40	0.34	0.24	0.39	0.24
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	594.11	594.13	594.24	594.29	594.35	594.50	594.63	594.24
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	268.94	519.89	1040.08	1278.11	1552.30	2576.79	3833.66	5132.41
η_{NPC}	%	88.68	93.91	96.64	97.12	97.50	98.06	98.29	97.87
Unsicherheit $\pm$	%	0.50	0.30	0.34	0.31	0.26	0.19	0.29	0.19
Unom - ohne Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	93.42	96.12	97.60	97.85	98.03	98.28	98.34	98.30
Unsicherheit $\pm$	%	0.55	0.29	0.17	0.22	0.15	0.15	0.13	0.13
$\bar{U}_{PV}$	V	595.55	595.60	595.59	595.62	595.63	595.74	595.83	595.93
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	277.36	527.09	1041.45	1289.72	1547.92	2580.74	3841.94	5141.19
$\bar{P}_{AC}$	W	259.12	506.66	1016.48	1262.00	1517.39	2536.47	3778.16	5053.73
η_{Boost}	%	99.49	99.64	99.88	99.89	99.89	99.93	99.94	99.94
Unsicherheit $\pm$	%	0.57	0.42	0.18	0.21	0.13	0.15	0.12	0.12
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	594.96	595.00	595.10	595.13	595.08	595.16	595.24	595.33
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	275.95	525.17	1040.21	1288.25	1546.22	2579.06	3839.78	5137.97
η_{NPC}	%	93.90	96.47	97.72	97.96	98.14	98.35	98.40	98.36
Unsicherheit $\pm$	%	0.58	0.44	0.20	0.17	0.15	0.16	0.14	0.14
Unom - mit Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	88.18	93.65	96.32	96.81	97.13	97.63	97.81	97.85
Unsicherheit $\pm$	%	0.53	0.35	0.22	0.16	0.14	0.17	0.13	0.13
$\bar{U}_{PV}$	V	595.74	595.58	595.67	595.70	595.76	595.90	596.05	596.16
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	275.85	525.39	1040.79	1289.32	1563.88	2580.61	3849.30	5141.05
$\bar{P}_{AC}$	W	243.24	492.04	1002.53	1248.14	1518.95	2519.37	3764.84	5030.40
η_{Boost}	%	99.26	99.34	99.62	99.68	99.80	99.76	99.85	99.89
Unsicherheit $\pm$	%	0.50	0.32	0.24	0.36	0.27	0.31	0.21	0.15
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	595.19	594.87	594.91	594.94	595.13	595.16	595.34	595.46
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	273.82	521.91	1036.82	1285.22	1560.69	2574.49	3843.43	5135.48
η_{NPC}	%	88.83	94.28	96.69	97.12	97.33	97.86	97.96	97.95
Unsicherheit $\pm$	%	0.56	0.35	0.25	0.36	0.27	0.29	0.23	0.16

Tabelle 18: Messungen bei maximaler PV- Eingangsspannung U_{max} (800 V)

U _{max} - ohne Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	85.64	92.53	96.00	96.64	97.01	97.70	97.84	97.73
Unsicherheit $\pm$	%	0.63	0.42	0.24	0.44	0.38	0.25	0.21	0.34
$\bar{U}_{PV}$	V	800.30	800.39	800.49	800.54	800.61	800.84	800.93	800.89
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	273.18	518.98	1038.18	1293.87	1552.86	2596.94	3869.41	5131.07
$\bar{P}_{AC}$	W	233.95	480.23	996.60	1250.37	1506.49	2537.33	3785.92	5014.49
η_{Boost}	%	99.18	99.58	99.71	99.68	99.68	99.78	99.84	99.85
Unsicherheit $\pm$	%	0.71	0.54	0.31	0.62	0.52	0.34	0.26	0.47
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	799.34	799.37	799.43	799.47	799.53	799.74	799.81	799.78
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	271.11	517.06	1034.85	1290.23	1548.53	2591.92	3863.58	5124.58
η_{NPC}	%	86.30	92.88	96.30	96.91	97.29	97.89	97.99	97.85
Unsicherheit $\pm$	%	0.64	0.42	0.24	0.45	0.38	0.25	0.21	0.34
U _{max} - mit Filter - Infratek 108A									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	80.00	89.66	94.56	95.40	96.11	97.03	97.37	97.45
Unsicherheit $\pm$	%	0.68	0.45	0.28	0.44	0.37	0.25	0.21	0.34
$\bar{U}_{PV}$	V	800.23	800.39	800.53	800.59	800.62	800.80	801.07	801.30
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	274.79	521.55	1041.13	1297.30	1551.05	2608.03	3872.56	5139.97
$\bar{P}_{AC}$	W	219.82	467.63	984.47	1237.57	1490.67	2530.48	3770.74	5008.71
η_{Boost}	%	98.89	99.44	99.64	99.64	99.74	99.77	99.82	99.86
Unsicherheit $\pm$	%	0.79	0.59	0.35	0.61	0.52	0.34	0.26	0.47
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	799.35	799.39	799.45	799.53	799.62	799.77	799.86	799.84
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	271.74	518.61	1036.64	1292.41	1546.78	2602.10	3865.39	5129.55
η_{NPC}	%	80.89	90.17	94.97	95.76	96.37	97.25	97.55	97.64
Unsicherheit $\pm$	%	0.68	0.45	0.28	0.44	0.38	0.25	0.21	0.34
U _{max} - ohne Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	85.72	92.75	96.03	96.59	96.95	97.63	97.85	97.88
Unsicherheit $\pm$	%	0.68	0.45	0.24	0.32	0.20	0.19	0.15	0.14
$\bar{U}_{PV}$	V	800.84	800.89	800.93	800.96	800.98	801.06	801.15	801.20
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	280.41	528.50	1039.97	1298.45	1546.36	2610.74	3873.82	5134.10
$\bar{P}_{AC}$	W	240.36	490.21	998.70	1254.16	1499.23	2548.86	3790.49	5025.23
η_{Boost}	%	99.08	99.77	99.81	99.79	99.84	99.90	99.93	99.93
Unsicherheit $\pm$	%	0.78	0.57	0.22	0.34	0.18	0.19	0.18	0.21
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	800.32	800.32	800.48	800.49	800.51	800.57	800.61	800.65
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	277.82	527.26	1038.01	1295.78	1543.89	2608.20	3871.03	5130.75
η_{NPC}	%	86.52	92.97	96.21	96.79	97.11	97.73	97.92	97.94
Unsicherheit $\pm$	%	0.72	0.53	0.24	0.27	0.19	0.22	0.20	0.23
U _{max} - mit Filter – N4L PPA5500									
$P_{PVS,MPP}/P_{V2AC,nom}$		0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.50	0.75	1.00
$\eta_{PV2AC,conv}$	%	81.04	89.69	94.49	95.42	95.99	97.04	97.40	97.50
Unsicherheit $\pm$	%	0.43	0.34	0.38	0.15	0.15	0.15	0.13	0.13
$\bar{U}_{PV}$	V	800.91	800.95	801.03	801.05	801.09	801.18	801.27	801.34
$\bar{P}_{PVS,DC \text{ Infra}}$	W	281.48	522.36	1042.60	1299.20	1548.01	2609.72	3873.86	5143.02
$\bar{P}_{AC}$	W	228.11	468.53	985.19	1239.72	1485.98	2532.37	3772.98	5014.63
η_{Boost}	%	99.33	99.49	99.48	99.63	99.75	99.85	99.88	99.86
Unsicherheit $\pm$	%	0.59	0.40	0.41	0.19	0.13	0.17	0.19	0.17
$\bar{U}_{DC+A \text{ Infra}}$	V	800.36	800.38	800.47	800.48	800.49	800.54	800.56	800.59
$\bar{P}_{Boost \text{ Infra}}$	W	279.60	519.72	1037.17	1294.42	1544.18	2605.86	3869.14	5135.98
η_{NPC}	%	81.58	90.15	94.99	95.77	96.23	97.18	97.51	97.64
Unsicherheit $\pm$	%	0.50	0.33	0.23	0.20	0.15	0.18	0.20	0.19