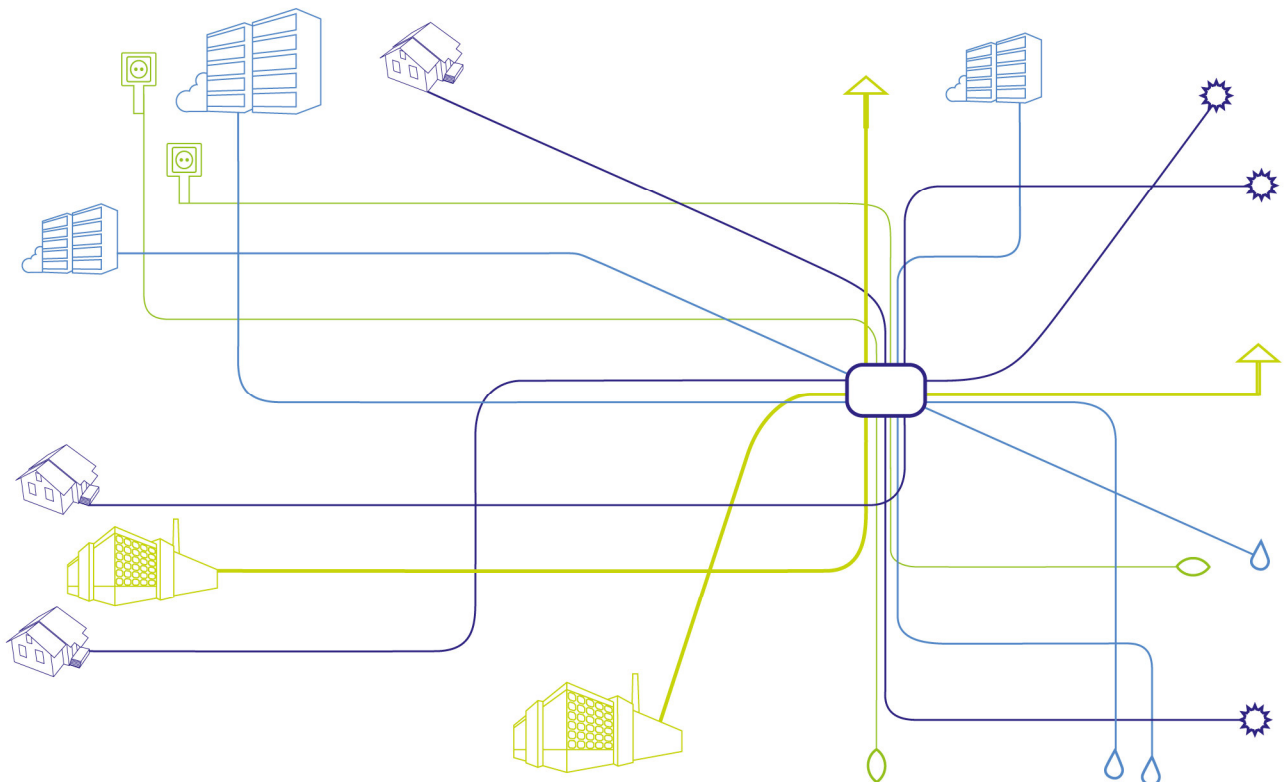




V2G-Inverter

Multi-Purpose Inverter für Smart Grids

Analyse der Wirkungskette Verteilnetz
bis Batterie mit bidirektionaler Ladung



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	6
2.1	Aufgabenstellung	6
2.2	Schwerpunkte des Projektes	7
2.3	Einordnung in das Programm	9
2.3.1	Energiestrategische Ziele	9
2.3.2	Systembezogene Ziele	10
2.3.3	Technologiestrategische Ziele	10
3	Inhaltliche Darstellung	12
3.1	Definition der Anforderungen	12
3.1.1	Technische Anforderungen an den V2G-Inverter	12
3.1.2	Normenrecherche	15
3.2	Spezifikation von Systemarchitekturen	15
3.2.1	Erforderliche Funktionsblöcke des V2G-inverters	17
3.2.2	Konstruktive Anforderungen an den V2G-inverter	18
3.2.3	Elektrotechnische Anforderungen an den V2G-inverter	20
3.2.4	Bewertung der Topologien	21
3.3	Spezifikation der ausgewählten Systemarchitektur	24
3.3.1	Netzanbindung	25
3.3.2	Steuer- Regeleinheit	25
3.3.3	Potentialtrennung	28
3.3.4	Leistungsstufe zur Anbindung der Batterie	29
3.3.5	Leistungsstufe zur Anbindung des PV-Systems	30
3.4	Entwicklung von anwendungsspezifischen Leistungshalbleitern	30
3.4.1	Simulation und Device-Modelle der neuen Technologie	30
3.4.2	Laufzettelerstellung, Einzelprozessentwicklung	31
3.4.3	Charakterisierung und Zuverlässigkeitsuntersuchungen	33
3.5	Evaluierung und Simulation des Gesamtsystems	37
3.5.1	Wirkungsgrad-Vergleichsmessung	37
3.5.2	PHIL Versuchsreihe	47
3.6	Wirtschaftlichkeitsanalyse	56
3.6.1	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse	60
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	65
5	Ausblick und Empfehlungen	65
6	Literaturverzeichnis	67
7	Anhang	73
8	Kontaktdaten	74

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Ausgangssituation

Die Sektoren Energieerzeugung und Verkehr sind die dominierenden Einflussfaktoren auf den CO₂ Ausstoß. Im Bereich der Energieerzeugung muss daher in Richtung erneuerbare Energieträger substituiert werden. Im Verkehrssektor erwartet man durch die Elektrifizierung des Individualverkehrs einen beträchtlichen Hebel. Zur Einbindung erneuerbarer, zu einem signifikanten Anteil örtlich dezentral verfügbarer Energieträger, ist es erforderlich, stochastisches Erzeugungsverhalten und Verbrauch aufeinander abzustimmen.

In Zukunft wird es daher notwendig sein, Technologien zur dezentralen Einbindung von Erzeugern und Speichern zu entwickeln. Im Zusammenhang mit Elektromobilität ergeben sich dabei neue zusätzliche Anforderungen hinsichtlich Betriebsverhalten, Betriebssicherheit und Kostenstruktur.

Forschungsbedarf besteht einerseits in systemischen Untersuchungen über die Netzintegration von dezentralen Speichern und Prosumern und andererseits in technologischen Entwicklungen zur energie- und kosteneffizienten Umsetzung von bidirektionalen Wandlertopologien.

Problemstellung

Die zentralen Fragestellungen vom Projekt V2G-inverter sind:

- Bidirektionale Wandler müssen energieeffizient und kostengünstig sein, sowie eine kompakte Bauform aufweisen. Dies ist eine Problemstellung hinsichtlich der technologischen Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnologie und der Topologieentwicklung.
- Die Abdeckung von Energiespitzen bzw. Bereitstellung von verschiedenen Leistungen bzw. Services (z.B. Netzservices, Regelernergie, lokale Bereitstellung von Kapazitäten, etc.) ist bei handelsüblichen unidirektionalen Invertern derzeit nicht möglich. Bidirektionale Inverter, die diese Services prinzipiell ermöglichen würden, sind derzeit nicht am Markt erhältlich.
- Die Auswirkung einer verstärkten Einbindung von DER (z.B. Photovoltaik, Windkraft, etc.) und Elektrofahrzeugen (EV) auf elektrische Verteilnetze ist speziell in Hinblick auf Einsatz von V2G-inverter noch sehr wenig untersucht und bedarf deshalb einer genauen Analyse.
- Die Erfüllung von diversen Anforderung hinsichtlich geltender Vorschriften bzw. Normen und Sicherheitsanforderungen bei der Einbindung von DER und EVs in Smart Grids ist besonders wichtig für den Einsatz des V2G-inverters zum Schutz von Personen und Maschinen und deshalb muss dieses Thema verstärkt betrachtet werden.

•

Ziel des V2G-inverter Projekts ist es daher, ein Konzept für einen bidirektionalen Wandler zu entwickeln, der als eine Art Energiezelle in einem Haushalt zusammen mit einer Photovoltaikanlage sowohl zur Ladung eines Elektrofahrzeuges (EV) als auch zur Einspeisung in das Verteilnetz verwendet werden kann. Darüber hinaus können aber auch kurzfristige Spitzen im Verteilnetz (sowohl durch Erzeugung als auch Verbrauch verursacht) über die bidirektionale Anbindung des Elektrofahrzeuges bzw. der Fahrzeugbatterie ausgeglichen werden.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Ziel des V2G-inverter Projekts ist es eine ökonomisch, legistisch und technisch optimale Systemarchitektur für die Wirkungskette vom Verteilnetz bis zur Batterie eines EV unter Berücksichtigung von bidirektionalem Ladebetrieb zu finden (siehe Abbildung 1). Dabei steht die Erarbeitung, Simulation und Verifikation von verschiedenen Topologien und Schaltungsvarianten für das V2G-inverter Projekt im Vordergrund der Forschungsarbeiten.

Um dies zu erreichen ist eine Spezifikation, Simulation und Entwicklung anwendungsspezifischer Halbleiter für den V2G-inverter notwendig. Ein weiteres Ziel ist die Erarbeitung einer Grundlage für eine Kostenstruktur verschiedener V2G Szenarien/Leistungen (z.B. Netzservices, Regelernergie, etc.) als Basis für Geschäftsmodelle, die für eine V2G-Lösung notwendig sind.

Die konkreten Haupt-, Neben- bzw. Nichtziele des V2G-inverter Projekts sind nachfolgend näher beschrieben:

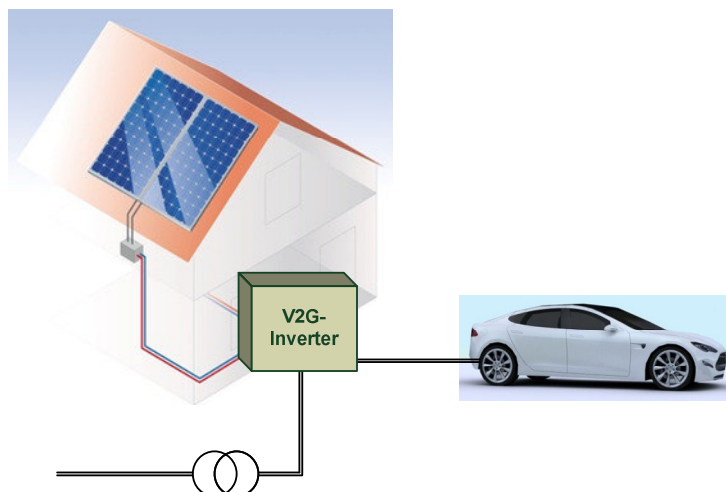


Abbildung 1: Schematische Projektdarstellung

Hauptziele

- Finden einer ökonomisch, legistisch & technisch optimalen Systemarchitektur für die Wirkungskette Verteilnetz - Inverter - Batterie unter Berücksichtigung von bidirektionalem Ladebetrieb
- Erarbeitung, Simulation und Verifikation von Topologien für V2G-inverter

- Spezifikation, Simulation und Entwicklung anwendungsspezifischer Halbleiter für V2G-Inverter
- Netzintegration von EV-Batterien als Speichertechnologie
- Erarbeitung der Kostenstruktur verschiedener V2G Szenarien/Leistungen (z.B. Netzservices, Regelleistung, etc.) als Basis für Geschäftsmodelle und deren Preisstruktur

Nebenziele

- Aufzeigen von Effizienzpotentialen unterschiedlicher Topologien und Technologien
- Berücksichtigung aktueller und Vordenken zukünftiger Rahmenbedingungen für die Netzintegration (z.B. Blindleistung, Anti-Islanding, Fehlerverhalten, etc.)
- Erarbeitung von Systemgrenzen (d.h. welche Teile der Wirkungskette Verteilnetz - Inverter - Batterie sind on-board bzw. off-board)
- Optimale Betriebszyklen in Hinblick auf (Energie- bzw. Strom-)Markt, Verfügbarkeit bzw. Batterielebensdauer
- Erarbeitung einer zielführenden Wandlertopologie
- Kommunikation mit Speicherelektronik (z.B. Fahrzeugelektronik, etc.)

Nicht-Ziele

- V2G-Inverter entwickelt keine Geschäftsmodelle für V2G Ansätze
- Keine Entwicklung von Batterien für Elektrofahrzeuge
- Keine Entwicklung von Photovoltaikzellen bzw. -modulen bzw. Zellen-/Modulelektronik

Angestrebte Projektergebnisse

- Hohe Energieeffizienz des V2G-Inverters (Wandlers); als Gesamtwirkungsgrad wird ein Zielwert durch die Verwendung von SiC Leistungshalbleitern von 95% angestrebt
- Möglichkeit des bidirektionalen Energieflusses (d.h. Ladung & Netzzurückspeisung) in einem Gerät
- Technologische Voraussetzung für das Bereitstellen von ancillary Services (z.B. Blindleistung)
- Topologien als Basis für eine spätere kompakte und kostengünstige Bauform
- Vorschläge für mögliche V2G Szenarien als Basis für zukünftige V2G Geschäftsmodelle

2.3 Einordnung in das Programm

2.3.1 Energiestrategische Ziele

Die folgenden Punkte werden mit den V2G-inverter Projektergebnissen angestrebt:

- *Beitrag zur Erreichung der 20-20-20 Ziele:* Die Sektoren Energieerzeugung und Verkehr sind die dominierenden Einflussfaktoren auf den CO₂ Ausstoß. Im Bereich der Energieerzeugung muss daher in Richtung erneuerbare Energieträger substituiert werden. Im Verkehrssektor erwartet man durch die Elektrifizierung des Individualverkehrs einen beträchtlichen Hebel. Zur Einbindung erneuerbarer, zu einem signifikanten Anteil örtlich dezentral verfügbarer Energieträger, ist es erforderlich, stochastisches Erzeugungsverhalten und Verbrauch aufeinander abzustimmen. Der im vorliegenden Projekt adressierte V2G-inverter stellt dahingehend eine Schlüsseltechnologie dar. Das Konzept ermöglicht die Ladung von Elektrofahrzeugen, die Netzintegration oder den Eigenverbrauch von Photovoltaikstrom, sowie das zur Verfügung stellen von Ausgleichsenergie oder Netzservices zur Unterstützung der weiteren Einbindung von erneuerbaren Energieträgern.
- *Reduktion der Importabhängigkeit bei Energieträgern:* Durch den Einsatz von Elektrizität aus erneuerbaren Energien (z.B. aus Photovoltaik oder Windkraft) wird eine Reduktion der Importabhängigkeit bei Energieträgern erreicht. Der World Energy Outlook 2009 der IEA geht für die EU von reduzierten Kosten für Ölimporte von 90 Mrd. USD im Jahr 2020 und 240 Mrd. USD im Jahr 2030 aus.
- *Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz:* Wesentliches Kriterium dieses Projekts ist der Beitrag zum emissionsfreien und lärmarmen Verkehr, sodass individuelle Mobilität in Zukunft gesichert werden kann. Eine erfolgreiche Realisierung der Projektziele trägt bereits kurz- bis mittelfristig signifikant zur Reduktion des Treibstoffbedarfs und damit der Emissionen bei und kann wesentlich zur Etablierung elektrischer Fahrzeuge am Markt beitragen. Die Forcierung elektrischer Fahrzeuge inklusive Infrastruktur entspricht dabei den Forderungen des IPCC Reports¹, um die definierten Ziele zur Stabilisierung des Klimawandels zu erreichen. Individuelle elektrische Mobilität, steht somit nicht mehr im Widerspruch zu ökologischen Forderungen nach z.B. Reduktion der CO₂ und Feinstaubemissionen.
- *Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen:* Die wirtschaftliche Bedeutung der Photovoltaik-Branche ist international anerkannt. In Deutschland waren Ende 2006 über 31.000 Personen in diesem Sektor beschäftigt². Die technologischen Fortschritte in der Photovoltaik werden in Österreich zur Sicherstellung und zum Weiterausbau von Arbeitsplätzen in dem Bereich dienen. Ein ähnliches Entwicklungspotential ist durchaus auch im Umfeld der Elektromobilität zu erwarten

¹ International Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Synthesis Report, November 2007.

² Der deutsche Photovoltaikmarkt 2006 – Vom Nachfrageüberhang zum Wettbewerb, Research and Markets, Guinness Centre, Taylors Lane, Dublin 8, Ireland, 2006.

2.3.2 Systembezogene Ziele

Die folgenden systembezogenen Ziele werden mit den V2G-inverter Projektergebnissen angestrebt:

- *Reduktion des Verbrauchs fossiler und nuklearer Energieträger:* Wesentliches Kernelement des Gesamtkonzeptes für Elektromobilität der Plattform Austrian Mobile Power (Plattformmitglieder sind u.a. AIT, SAGOE und IFAT) ist der ausschließliche Einsatz von Strom aus erneuerbarer Energie, wobei nur neue Kapazitäten eingerechnet werden sollen. Durch die Substitution von fossilen Treibstoffen wird der Verbrauch an fossilen Energieträgern reduziert. Der ausschließliche Einsatz von Strom aus erneuerbaren vermeidet den Einsatz nuklearer Energieträger.
- *Entwicklung von Schlüsseltechnologien:* Im Projekt wird eine Schlüsseltechnologie entwickelt, die für die Einführung der Elektromobilität sowie für die Realisierung der V2G Vision erforderlich sind und die im Vergleich zum Stand der Technik einen wesentlichen Sprung bedeutet. Die entwickelte Technologie kann somit zu einer international sichtbaren Innovationsführerschaft österreichischer Unternehmen führen und dadurch die lokale Wertschöpfung stärken.
- *Herstellung und Optionenvielfalt bei Technologien und Energieträgern:* Durch die Einführung von Elektromobilität wird Strom als neuer Energieträger etabliert. Die Optionenvielfalt bei der Wahl der Energieträger erhöht sich dadurch.
- *Multiplizierbarkeit und Hebelwirkung:* Die Ergebnisse können für andere Leistungselektronik-basierte Technologien verwertet werden. Somit ist die Multiplizierbarkeit der Ergebnisse gegeben.
- *Systemische Integration der vorhandenen Energieinfrastruktur und der innovativen Bestandteile in ein intelligentes Energiesystem (Smart Grid):* Im V2G-inverter Projekt werden innovative Konzepte und Ansätze für bidirektionale Wechselrichter entwickelt werden. Diese Konzepte ermöglichen die Einbindung der Elektromobilität als Verbraucher bzw. auch als Erzeuger für den kurzfristigen Ausgleich von Bedarfsspitzen. Weiters wird dadurch auch die intelligente Anbindung von dezentralen Erzeugungsanlagen in den Netzbetrieb und deren Wechselwirkung im Projekt analysiert und bewertet.

2.3.3 Technologiestrategische Ziele

Die folgenden technologiestrategischen Ziele werden mit den V2G-inverter Projektergebnissen angestrebt.

- *Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils im Energiesystem:* Durch den Einsatz von Strom für Mobilität, der regional aus erneuerbaren Energien (z.B. Photovoltaik bzw. Windkraft) gewonnen wird, steigt der inländische Anteil der Wertschöpfung nachhaltig. Die Ergebnisse des V2G-inverter Projekts ermöglichen die Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen in die Versorgung der Elektromobilität sowie die Realisierung der V2G Vision.
- *Forcierung von Kooperationen und Partnerschaften zwischen Wirtschaft und Wissenschaft:* Die Umsetzung des V2G-inverter Projekts beruht auf einer engen Kooperation zwischen Industrie- und Forschungspartnern mit jeweils unterschiedlichen Wissensschwerpunkten. Die Verfügbarkeit von modernsten Entwicklungsumgebungen und einem fundierten technischen Know-how und langjähriger Expertise bietet eine ideale Plattform, um Innovations- und Synergiepotentiale optimal nutzen zu können.

- *Innovative Produkte und Dienstleistungen für mehr Arbeitsplätze:* Die wirtschaftliche Bedeutung der Photovoltaik Branche ist unumstritten. Die technologischen Fortschritte in der Photovoltaik aber auch zunehmend in der Elektromobilität werden in Österreich zur Sicherstellung und für den Weiterausbau von Arbeitsplätzen in diesen Bereichen dienen.
- *Verstärkung interdisziplinärer Kooperationen und des Systemdenkens:* Die in diesem Projekt kooperierenden Partner kommen aus unterschiedlichen Branchen. Als wissenschaftliche Partner wird einerseits das größte außeruniversitäre Forschungszentrum Österreichs, das AIT, mit seinen Departments Energy und Mobility und andererseits die TU Wien mit der Energy Economics Group Know How einbringen. Die Komplexität des Gesamtprojektes kann nur durch die Bündelung der Kompetenzen eines jeden dieser Partner bewältigt werden.
- *Verstärkung internationaler Kooperationen und Ausbau der internationalen Führungsrolle:* Technologieführerschaft ist einer der Schlüsselfaktoren für die Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen. Die Umbrüche, die derzeit stattfinden, bieten für innovative Unternehmen die Chance, neue Marktsegmente zu erschließen und ihren Technologie- und Marktvorsprung auszubauen. Für die, im V2G-inverter Projekt kooperierenden internationalen Unternehmen (d.h. SAGOE und IFAT), dient das Projekt auch dazu, international Aufmerksamkeit zu erregen und die gewonnenen Erkenntnisse in den verbundenen Unternehmen bzw. anderen Kooperationen einzusetzen. Für die beiden wissenschaftlichen Partner, AIT und EEG, stellt das V2G-inverter Projekt ebenfalls eine sehr gute Basis da, um die internationale Kooperation und Vernetzung im Forschungsbereich auf- und auszubauen.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Definition der Anforderungen

3.1.1 Technische Anforderungen an den V2G-Inverter

In diesem Projektabschnitt wurden die technischen Anforderungen an ein fahrzeugexternes, bidirektionales Ladegerät für Elektrofahrzeuge (V2G-inverter) behandelt. Die angeführten technischen Anforderungen bzw. Parameter basieren zum einen auf der vorhergehenden Normenrecherche. Zudem wurden Anforderungen aus einer Technologie- bzw. Marktrecherche abgeleitet, und die vorliegenden Anforderungen der Automobilindustrie berücksichtigt. Natürlich haben auch die Erfahrungswerte aus vorhergehenden Produktentwicklungen von verwandten SIEMENS Produkten Einfluss genommen.

An dieser Stelle sei ergänzend erwähnt, dass die Anforderungen (insbesondere in Hinblick an EMV und Netzurückwirkungen) primär vom Einsatzgebiet der jeweiligen Gerätschaft abhängen. Für den weiteren Projektverlauf, sowie für die zu erstellenden Demonstratoren (Prototypen) wird unterstellt, dass der Haupteinsatzbereich des V2G-inverters in Wohngebieten, d.h. in Privathaushalten, erfolgen wird. Die Installation der Gerätschaft muss durch geschultes Fachpersonal erfolgen. Zudem ist eine ortsfeste Installation auf Grund der Funktion der Energierückspeisung zwingend notwendig (definierter Einspeisepunkt).

Die nachfolgende Tabelle 1 stellt die sich ergebenden technischen Anforderungen an den V2G-Inverter dar.

Tabelle 1: Technische Anforderungen an den V2G-Inverter

Anforderung	Beschreibung	Bemerkung
Berührungsschutz	Galvanische Trennung zwischen fahrzeugexternem Ladegerät und dem Elektrofahrzeug	
Eingangsspannung (AC)	3-ph, 400 V	
Toleranzbereich der Eingangsspannung (static)	+/- 10%	
Eingangsstrom (AC)	<u>10 kW-Ausführung:</u> max. 16 A @ 3-ph, 400 V <u>20 kW-Ausführung:</u> max. 32 A @ 3-ph, 400 V	
Eingangsfrequenz	50 Hz / 60 Hz	
Ausgangsspannung (DC)	200 V bis 500 V	Die obere Spannungsgrenze von 500 V DC geht aus dem CHAdeMO-Standard hervor
Strom-Ripple des Ausgangsstromes	$I_{\text{Ripple}} < 1\%$	Angabe bezieht sich auf den Nennstrom I_{Nenn} , diese Anforderung geht aus dem CHAdeMO-Standard hervor
Toleranzbereich der DC-Ausgangsspannung (static)	+/- 1%	+/- 1% beziehen sich auf die Messgenauigkeit der Erfassung der Ausgangsspannung
Power Factor (PF)	$\geq 99\%$	Angabe bezieht sich auf einen Leistungsbereich von 50 % bis 100 % der Nennleistung
Total Harmonic Distortion (THD)	$\leq 5\%$	
Ausgangsnennleistung (Dauerleistung)	• 10 kW oder • 20 kW	
Spannungs-Ripple der Ausgangsspannung	< 5% max. bezogen auf 200V (Spitze - Spitze)	
max. DC-Ausgangsstrom	<u>10 kW-Ausführung:</u> 25A +10% <u>20 kW-Ausführung:</u> 50A +10%	

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Last-Regelung	UI-Characteristic	Ladeschlussspannung wird beim Handshake vom BMS an den Charger übergeben; Strom-Sollwert wird laufend vom BMS an den Charger übergeben
Wirkungsgrad	• 90 % - 95% für konventionelle Halbleitertechnologie • $\geq 98\%$ für SiC-Technologie	Der Wirkungsgrad muss bis 80% SOC des Fahrzeugakkumulators erfüllt werden können, dies geht aus der uns vorliegenden Ladekennlinie hervor (Reduktion der Leistung ab 80% SOC).. Die Angabe bezieht sich nur auf den Leistungsteil.
Mindestens erforderliche Schutzeinrichtungen	Kurzschlusschutz Übertemperaturschutz Überlastschutz	
Schutzklassen	• mind. IP34 für Indoor-Ausführung • mind. IP44 für Outdoor-Ausführung	
Betriebstemperatur Bereich	• -20°C bis +50°C für Indoor-Ausführung • -30°C bis +50°C für Outdoor-Ausführung	
Luftfeuchtigkeit	$\leq 95\%$ rel. Luftfeuchtigkeit	
Maximale Aufstellhöhe	2000m über NN	
Geräusch Emission	• < 50 dB @ 1 m im Normalbetrieb • < 65 dB @ 1m bei max. Temp. und max. Leistung	
Störfestigkeit	• Störfestigkeit Wohnbereich gem. DIN EN 61000-6-1 und • Störfestigkeit Industrie gem. DIN EN 61000-6-2	
Störaussendung	• Störaussendung Wohnbereich gem. DIN EN 61000-6-3 und • Störaussendung Industrie gem. DIN EN 61000-6-4	
Netzurückwirkungen	• entsprechend DIN EN 61000-3-11 (Flicker bis 75A) und • entsprechend DIN EN 61000-3-12 (Harmonics bis 75A)	

3.1.2 Normenrecherche

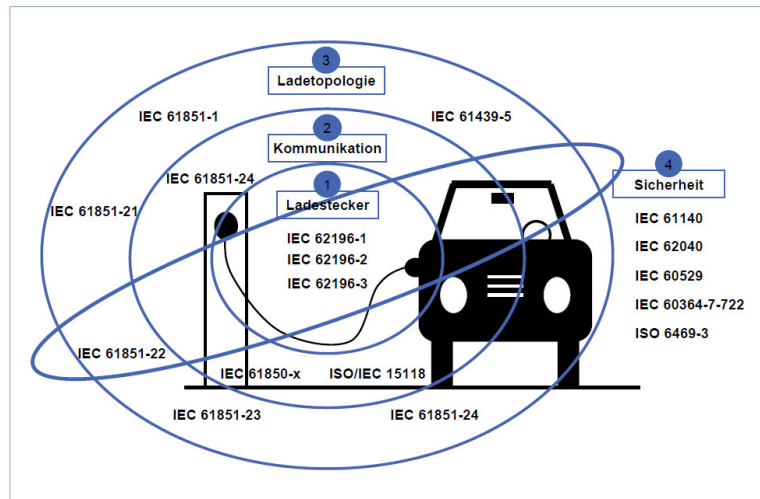


Abbildung 2: Auszug relevanter Normen und Projekte zur Ladeschnittstelle [NPE, 2010]

Abbildung 2 zeigt einen Abriss der Komplexität in der sich die Standardisierung rund um Evs wiederfindet.

Um die zukünftige Normenlage für einen bidirektionalen Laderegler abschätzen zu können wurden die nachfolgenden Standardisierungs Initiativen für Elektromobilität identifiziert:

- IEC Smart Grid Standardisation Roadmap
- Die Deutsche Normungsrroadmap E-Energy/Smart Grids
- Focus Group on European Electro Mobility
- Nationale Plattform für Elektromobilität – Deutschland
- Die Deutsche Normungs Roadmap Elektromobilität
- VDE N4105

Eine detailliertere Ausarbeitung der Anforderungen und des Normenstandes zum Zeitpunkt der Erstellung des Anforderungsreportes (Stand Juni 2011) ist dem beigelegten Deliverable D2.1 zu entnehmen.

3.2 Spezifikation von Systemarchitekturen

Im V2G-Inverter Projekt wurde eine Vielzahl von Schaltungstopologien untersucht, welche für den Einsatz als bidirektionale Ladetopologien von Bedeutung sind. Als Auswahlverfahren wurde eine Art Trichterverfahren gewählt. Hierfür wurden zuerst alle bekannten Systemtopologien gesammelt. Hier wurde eine generelle Einteilung in Monolithische Konzepte und Modulare Konzepte getroffen.

Monolithische Konzepte (einstufige Konzepte):

Hier wird die gesamte Lade-Funktionalität (d.h. die AC/DC-Wandlung) als eine Einheit dargestellt. D.h. das Ladegerät wird in einer Einheit realisiert.

Modulare Konzepte (mehrstufige Konzepte):

Bei den modularen bzw. mehrstufigen Konzepten wird die Ladeeinheit im Wesentlichen in zwei Einzelstufen aufgetrennt: In die Eingangsstufe (AC/DC-Wandler) und in die Ladestufe (DC/DC-Wandler).

- **Eingangsstufe (Front-End):**

Die Eingangsstufe (Front-End) ist jene Komponente, welche die AC/DC-Wandlung realisiert.

Anmerkung: Basierend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Normenrecherche (siehe Deliverable 2.1) muss die Eingangsstufe für den V2G-inverter den normativen Anforderungen in Hinblick auf den Einsatz des Gerätes in Haushaltsnetzen gerecht werden und eine möglichst sinusförmigen Stromaufnahme aus dem speisenden Drehstromnetz gewährleisten. Zudem konnten im Rahmen der Normenrecherche aus der deutschen Photovoltaik-Branche stammende Normungsaktivitäten identifiziert werden, welche zukünftig die Funktionalität einer optionalen Blindleistungskompensation (sowohl kapazitiv als auch induktiv) zum Ziel haben und sich auch auf den V2G-inverter übertragen lassen.

- **Ausgangs- bzw. Ladestufe:**

Die Lade- bzw. Ausgangsstufe ist jene Komponente, die der Eingangsstufe nachgeschaltet wird und auf der DC-Seite die Spannungsanpassung (d.h. die DC/DC-Wandlung) sicherstellt. In der Praxis finden sich Ladestufen, welche sowohl mit als auch ohne Potentialtrennung (Transformator) kombiniert sind.

Anmerkung: Basierend auf den Erkenntnissen der vorhergehenden Normenrecherche (siehe Deliverable 2.1 – Kapitel 2.5.3) werden für den Einsatz im V2G-inverter ausschließlich Ladestufen mit Potentialtrennung als relevant erachtet. In Hinblick auf eine möglichst geringe Verlustleistung und damit einen positiven Einfluss auf den Systemwirkungsgrad sollte die Potentialtrennung über eine möglichst hochfrequent getaktete Transformator-Topologien realisiert werden.

Die Kombination aus Eingangsstufe (bzw. Front-End) und Ausgangs- bzw. Ladestufe ergibt eine vollständige Ladeeinheit.

Die nachfolgenden Topologien wurden untersucht:

Monolithische Konzepte

Boost-PFC Converter

Bridgeless-PFC Converter

Buck-Boost Converter

Cúk Converter

Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)

Modulare Konzepte (Eingangsstufen/Front-End Systeme)

Sechspuls Brückenschaltung “passiv”

Sechspuls Brückenschaltung “aktiv”

Dreiphasiger 3-Level Converter

Vienna Rectifier

Modulare Konzepte (Ausgangstufen/Ladestufen)

Series Resonant LC-Fullbridge with Buck Boost Converter

Series Resonant LC-Fullbridge with interleaved Buck Boost Converter

Half-Bridge Forward Converter

Half-Bridge Converter with active Current Doubler

Full-Bridge Forward Converter

Full-Bridge Converter

Current Doubler

Full-Bridge with active Center-Tap

3.2.1 Erforderliche Funktionsblöcke des V2G-inverters

Abbildung 3 stellt sämtliche für den V2G-Inverter erforderlichen Funktionsblöcke dar. Diese Darstellung beinhaltet die Berücksichtigung der Einbindung von Photovoltaik. Diese Funktionsblöcke leiten sich zum Teil aus der Normenrecherche (Deliverable 2.1) und zum Teil aus Erfahrungswerten vorhergehender Produktentwicklungen ab. Ein Bewusstsein für die Erfordernisse der genannten Funktionsblöcke bzw. Module ist für die nachfolgenden Kapitel bzw. Diskussionen (insbesondere On-Board vs. Off-Board Montage des V2G-Inverters) von wesentlicher Bedeutung.

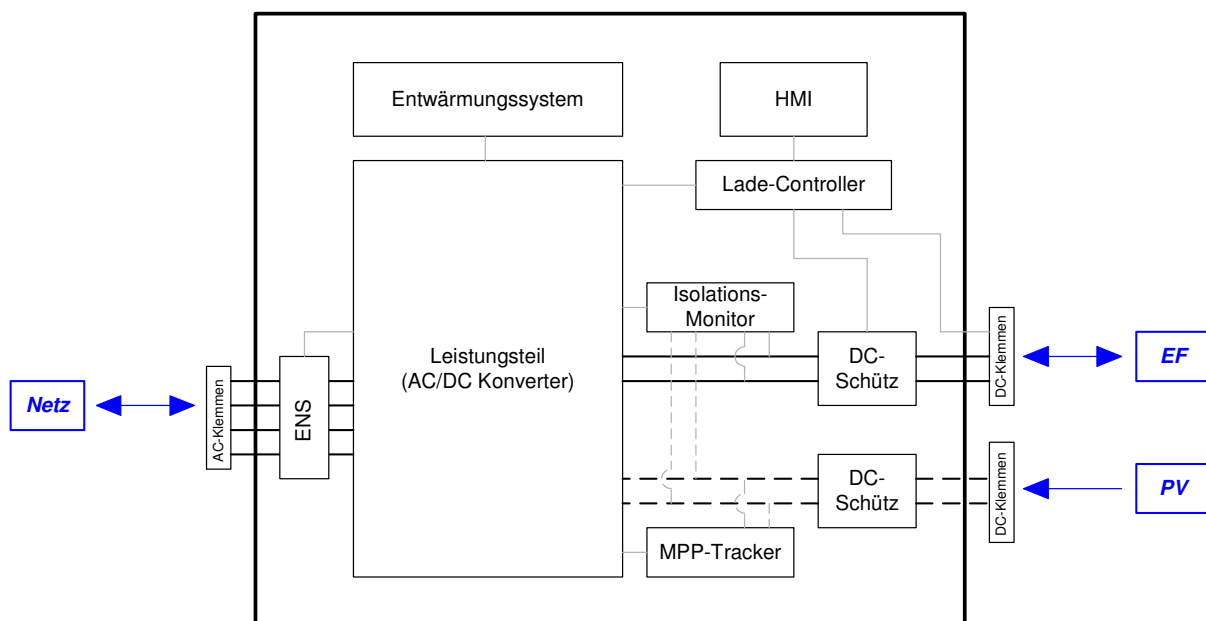


Abbildung 3: Funktionsblöcke des V2G-Inverters (Die Energieflussrichtung wird durch die blauen Pfeile symbolisiert)

3.2.2 Konstruktive Anforderungen an den V2G-Inverter

Die konstruktiven Eigenschaften des Inverters behandeln seine Größe und Form und daraus resultierend die Montageposition des Inverters. Nachdem das Projektziel des V2G-Inverter Projektes nicht ein serienreifes Produkt sondern ein Demonstrator ist, können die konstruktiven Eigenschaften des Inverters reduziert werden. Es muss also lediglich betrachtet werden, ob der Inverter im Fahrzeug (als On-Board Inverter) oder außerhalb des Fahrzeuges (als Off-Board Inverter) positioniert werden soll. Daraus resultiert, dass für einen On-Board Inverter gewisse Maximalgrößen nicht überschritten werden dürfen. Für einen Off-Board Inverter ist dieses Maximum viel weicher definiert. Es reicht, wenn angenommen werden kann, dass für den Inverter in einem typischen Haushalt (bzw. Auto-Garage) Platz ist.

3.2.2.1 On-Board vs. Off-Board Montage des V2G-Inverters

3.2.2.1.1 On-Board Montage

- **Vorteile On-Board Montage:**

Der wesentliche Vorteil einer On-Board Montage des Inverters liegt darin begründet, dass das EF zum Laden an standardisierten 1-phasigen bzw. 3-phasigen AC-Anschlussstelle (je nach Leistung des Inverters) angeschlossen werden kann und der Ladepunkt somit nicht auf den Installationsort eines fahrzeugexternen DC-Chargers beschränkt ist. Dies entspricht dem sogenannte "Charge Everywhere"-Konzept, welches von der Elektromobilitätsplattform AMP verfolgt wird.

Dem Projektkonsortium liegen weiters Informationen aus der Automobilindustrie vor, demnach es Bestrebungen seitens der OEMs gibt, den in den EFs vorhandenen Fahrumrichter auch als Ladeeinheit und den Antriebsmotor als Induktivität (Glättungs-drossel) zur Glättung der Welligkeit des Batterie-Ladestromes zu verwenden, was eine deutliche Gewichts- und Kosteneinsparung mit sich bringen könnte.

Der im EF installierte Fahrumrichter bietet zudem grundsätzlich die Funktionalität einer Energierückspeisung (Stromfluss von der Batterie in ein Drehstromsystem bzw. in den Antriebsmotor im Fahrbetrieb und Rückspeisung vom Antriebsmotor in die Fahrzeugbatterie im Rekuperationsbetrieb). D.h. es sind Synergien mit zwangsläufig im Fahrzeug verbauten Komponenten vorhanden, welche theoretisch für einen bidirektionalen Ladebetrieb mit verwendet werden könnten.

- **Nachteile On-Board Montage:**

Bei einer On-Board Montage des Inverters kann das EF zwar an allen standardisierten 1-phasigen bzw. 3-phasigen AC-Anschlussstelle aufgeladen werden. Jedoch müsste speziell in Hinblick auf den Netz-Rückspeisebetrieb die nachgelagerte Infrastruktur eine Rückspeisung unterstützen bzw. den normativen Anforderungen hierfür entsprechen (z.B. Einsatz eines geeigneten Fehlerstrom-Schutzschalters, etc.). Da dies nicht einfach bewerkstelligbar ist, würde eine On-Board Montage des

Inverters speziell im Rückspeisebetrieb den Vorteil des "Charge Everywhere"-Konzeptes zunichte machen.

Bei der Verwendung der in den EFs vorhandenen Fahrumrichter als Ladeeinheit wäre zwar topologisch eine Netzspeisung von der Fahrzeugbatterie ins öffentliche Stromnetz möglich. Allerdings fehlen dem Antriebssystem hierzu unbedingt erforderliche Komponenten. Zum einen fehlt der Netz-Filter, welcher zur Sicherstellung der Netzqualität erforderlich ist. Darüber hinaus fehlt die galvanische Potentialtrennung, welche als die bevorzugte Maßnahme zum Schutz gegen direktes Berühren identifiziert wurde und zudem von den OEMs gefordert wird (siehe Deliverable 2.1 / Kapitel 2.5.3).

Eine On-Board Installation des V2G-inverters bzw. eine Nachrüstung der für den Rückspeisebetrieb erforderlichen Komponenten hätten eine deutliche Gewichtszunahme zur Folge, was sich wiederum negativ auf die Reichweite des EFs auswirken würde.

Ein weiterer Aspekt, welcher gegen eine Installation des V2G-inverters im EF spricht, ist jener, dass eine Einbindung von erneuerbaren Energiequellen (z.B. Photovoltaik) technisch äußerst schwierig zu realisieren wäre. Hierzu müssten sämtliche in *Abbildung 3* dargestellte Funktionsblöcke in das EF integriert und am Fahrzeug ein zusätzlicher DC-Anschluss für die PV-Anlage vorgesehen werden.

3.2.2.1.2 Off-Board Montage

- **Vorteile Off-Board Montage:**

Der wesentliche Vorteil einer Off-Board Montage ist, dass die Einbindung von erneuerbarer Energiequellen (Photovoltaik, Wind) technisch relativ einfach möglich ist. Dieser Aspekt ist entscheidend, da die Einbeziehung von PV-Systemen ein Projektziel darstellt. Weiters ist das Rückspeisen ins Netz nur an definierten Einspeisepunkten möglich bzw. erlaubt, das heißt es bedarf hierzu stationär angeschlossene bzw. ortsfeste Systeme (siehe auch Deliverable 2.1 / Kapitel 3.1). Darüber hinaus spielen die Aspekte Größe und Gewicht des V2G-inverters bei einer Off-Board Installation eine deutlicher untergeordnetere Rolle, als bei einer On-Board Installation (Reichweithematik).

Weiters sei an der Stelle erwähnt, dass dem Projektkonsortium Informationen aus der deutschen Automobilindustrie vorliegen, welche zukünftig zu deren EFs fahrzeugexterne DC-Ladeeinheiten anbieten wollen.

- **Nachteile Off-Board Montage:**

Ein Nachteil der Off-Board Montage des V2G-inverters liegt darin begründet, dass ein externes DC Ladegerät eine relativ material- und kostenintensive Zuleitung von der Ladeeinheit zum EF erfordert. Eine „kleine“ On-Board Ladeeinheit wird zusätzlich zum fahrzeugexternen Inverter dennoch erforderlich. Den aktuell vorliegenden Informationen aus der Automobilindustrie zufolge werden EFs zukünftig standardmäßig über eine unidirektionale 3,3kW On-Board Ladeeinheit verfügen, welche es erlaubt, im Notfall das EF an einphasigen 16A Schuko-Steckdosen laden zu können. Die EFs werden so dem "Charge Everywhere"-Konzept gerecht.

3.2.2.2 Fazit

Gem. den soeben diskutierten Aspekten und wie auch bereits im Deliverable 2.1 (Kapitel 3.1) herausgearbeitet, ist eine On-Board Montage des V2G-inverters als nicht zielführend identifiziert. Es wurde daher für den weiteren Projektverlauf beschlossen eine fahrzeugextere Lösung zu verfolgen.

3.2.3 Elektrotechnische Anforderungen an den V2G-inverter

3.2.3.1 Bidirektionalität

Unter Bidirektionalität versteht man die Möglichkeit, mit dem Ladegerät sowohl die Batterie des Fahrzeuges mit der Energie des Netzes zu laden, als auch die in der Batterie gespeicherte Energie dem Netz zur Verfügung zu stellen. Durch die Bidirektionalen Eigenschaften des Ladegerätes ist die Nutzung des Speichers eines Elektrofahrzeuges für Netz-Services (siehe Deliverable 2.1 / Kapitel 5) möglich. Aufgrund der Projektdefinition ist die Rückspeisefähigkeit (Bidirektionalität) eine unbedingte Anforderung an die Systemtopologie.

3.2.3.2 Elektrische Potentialtrennung

Aus der im Zuge des Projektes durchgeführten Normenrecherche (dargestellt im Deliverable 2.1) geht eine elektrische Potentialtrennung nicht als unbedingt notwendig hervor. Es gibt allerdings ganz klare Anforderungen aus der Automobilindustrie, in denen eine galvanische Trennung gefordert wird. Es wurde daher innerhalb des Projektkonsortiums beschlossen, die elektrische Potentialtrennung als notwendige technische Eigenschaft zu beachten.

Die Potentialtrennung wird üblicherweise über eine hochfrequent getaktete Transformator-Topologien sichergestellt, mit dem Fokus auf eine möglichst geringe Verlustleistung und damit einen positiven Einfluss auf den Systemwirkungsgrad.

3.2.3.3 Verwendung von SiC Halbleiterbauteilen

Der Einsatz von SiC Halbleiterbauteilen ist wesentlicher Bestandteil des gegenständlichen Forschungsprojektes. Es ist angedacht, die im Rahmen des Projektes zu erstellenden Demonstratoren (Prototypen) vorerst mit konventionellen Halbleiterbauteilen (auf Silizium Basis) aufzubauen und diese in einem weiteren Schritt durch SiC Halbleiterbauteile zu ersetzen. Ziel ist es, möglichst viele Bauteile in SiC Technologie auszuführen, sofern dies technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Es wird im Rahmen der technischen Realisierung des V2G-inverter Leitungsteils entschieden, welche Komponenten der Gesamttopologie sinnvoll mit SiC Halbleiterbauteilen ausgeführt werden können. In der folgenden Topologie-Bewertung wird für die jeweilige Topologie deren Ausführbarkeit mit SiC Bauteilen betrachtet, bzw. diese in der Bewertung entsprechend berücksichtigt.

3.2.3.4 Möglichkeit der Einbindung von Photovoltaik

Die Möglichkeit der Einbindung von erneuerbaren Energiere Ressourcen (Photovoltaik) stellt eine wesentliche elektrotechnische Anforderung an den V2G-inverter dar, weshalb auch die Systemtopologie des V2G-inverter Leistungsteils diese Funktionalität unterstützen soll.

Gemäß der Projektdefinition ist es ein Ziel des V2G-inverter Projektes, ein Konzept für einen bidirektionalen Wandler zu entwickeln, welches als eine Art Energiezelle in einem Haushalt zusammen mit einer Photovoltaikanlage sowohl zur Ladung eines EFs als auch zur Einspeisung in das Verteilnetz (aus der Fahrzeugbatterie wie auch aus der PV-Anlage) verwendet werden kann.

3.2.3.5 Dreiphasiger Netzanschluss

Eine weitere für die Schaltungstopologien relevante elektrotechnische Eigenschaft des V2G-inverters stellt der dreiphasige AC-Anschluss dar.

Im Rahmen der Erstellung des Anforderungsreports (Deliverable 2.1 / Kapitel 3.1) wurde der dreiphasige Anschluss bereits festgelegt. Darin wurde eine Ladeleistung von mindestens 11 kW (16A @ 3-ph, 400V) als sinnvoll identifiziert. Höhere Leistungen wurden (z.B. für den Einsatz des Inverters in Schnellladestationen) ebenfalls berücksichtigt.

Gemäß der Untersuchungen der Leistungen und Services des V2G-inverters (Deliverable 2.1 / Kapitel 5) wird bei einer Ladeleistung von 11 kW für die Bereitstellung von 10 MW Leistung (Bezug für Sekundär- oder Tertiärleistung) nur ein Drittel der Fahrzeuge im Vergleich zu einer einphasigen Ladung (230V, 16A) benötigt.

Zudem erscheint ein dreiphasiger Netzanschluss in Hinblick auf eine symmetrische Netzbelastung und auch Netzeinspeisung als technisch die eindeutig zu bevorzugende Lösung.

3.2.4 Bewertung der Topologien

Die Bewertung der Topologien erfolge in einem zweistufigen Verfahren. In der ersten Stufe dieses Verfahrens wurden jene Topologien gefiltert die den gegebenen technischen Anforderungen nicht gerecht werden.

Alle Monolithischen Topologien ermöglichen auf Grund des einstufigen Aufbaus weder eine galvanische Trennung der Eingangs- und der Ausgangsseite, noch eine Einbindung von Photovoltaik. Somit können sämtliche monolithischen Konzepte als nicht zielführend betrachtet werden. Es verbleiben somit ausschließlich Kombinationen von Front-End Systemen und Ladestufen (mehrstufige Konzepte) als mögliche zielführende Topologien.

Jedoch werden auch nicht alle mehrstufigen Konzepte den technischen Anforderungen an den V2G-inverter gerecht. Jene Topologie, welche nicht sämtliche technischen Anforderungen erfüllen kann, wird ausgeschieden und diese für alle weiteren Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt.

Die nachfolgende *Tabelle 2* listet jene Topologien auf die als nicht zielführend identifiziert wurden:

Kapitel	Bezeichnung
2.1.1	Boost-PFC Converter
2.1.2	Bridgeless-PFC Converter
2.1.3	Buck-Boost Converter
2.1.4	Cúk Converter
2.1.5	Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)
2.2.1	Sechspuls-Brückenschaltung "passiv" (B6U)
2.2.4	Vienna Rectifier
2.3.3	Half Bridge Forward Converter
2.3.5	Full Bridge Forward Converter
2.3.7	Current-Doubler

Tabelle 2: Nicht zielführende Topologien

Um aus den verbleibenden Topologien eine Zieltopologie zu identifizieren wurden Bewertungsmodalitäten eingeführt und angewandt.

Die Kriterien für diese Beurteilung waren die folgenden (für eine detaillierte Erläuterung der Kriterien wird auf das D3.1 Kapitel 4.3 verwiesen):

- Bidirektionalität
- Galvanische Trennung
- Einfluss durch Silizium-Karbid
- Größe
- Verlustleistung
- Anzahl der Transistoren
- Entwicklungsaufwand
- Magnetics
- Geräusch
- Gewicht
- Netzfilteraufwand

Daraus hat sich das in Tabelle 3 dargestellte Bewertungsergebnis ergeben.

Eingangsstufe	Ladestufe	Rückspisefähig	Galvanische Trennung	SiC Einfluss	Größe	Verlustleistung [%]	Anzahl Transistoren	Entwicklungsaufwand	Magnetics	Geräusch	Gewicht	Netzfilteraufwand	Summe
3-level 3 phase	SRC + interleaved Buck-Boost	0	0	1,5	5	6,3	24	8	6	1	4	3	52,0
3-level 3 phase	SRC + Buck-Boost	0	0	1,57	5	7,8	22	8	5	1	4	3	52,3
B6 aktiv	SRC + interleaved Buck-Boost	0	0	1,8	4	6,5	18	6	6	3	4	5	52,6
B6 aktiv	SRC + Buck-Boost	0	0	2	4	8	16	6	5	3	4	5	53,0
3-level 3 phase	Full Bridge + act. current doubler	0	0	1	5	9,3	18	10	6	1	4	5	58,0
B6 aktiv	Full Bridge + act. current doubler	0	0	1	4	9,5	12	8	6	3	4	7	58,3
3-level 3 phase	Full Bridge + act. center tap	0	0	1	4	12,3	18	10	5	1	4	4	59,0
B6 aktiv	Full Bridge + act. center tap	0	0	1	3	12,5	12	8	5	3	4	6	59,3
Gewichtung		1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	

Tabelle 3: Bewertung der zielführenden Topologien

Für den Bau des V2G-inverter Demonstrators (Prototyp) wurde der dreiphasige „3 Level Converter“ als Eingangsstufe (Front-End System), der „Serial Resonant Converter“ (SRC) als hochfrequent getaktete Potentialtrennung und der „Interleaved Buck-Boost Converter“ als Ladestufe als die zielführende Topologie ausgewählt.

3.3 Spezifikation der ausgewählten Systemarchitektur

Auf Basis des oben dargestellten technischen Konzepts wird die nachfolgend als Blockschaltbild dargestellte Systemarchitektur für den V2G-Inverter festgelegt.

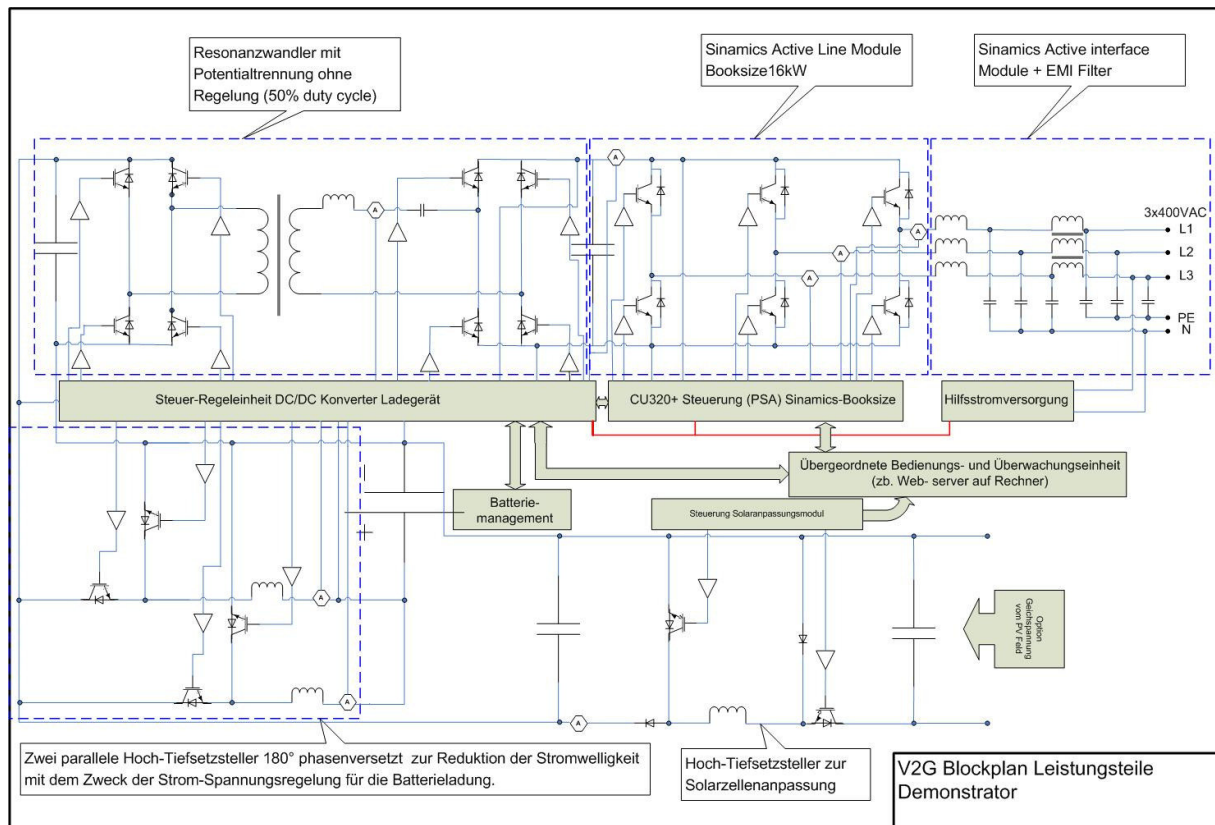


Abbildung 4: Systemarchitektur als Blockschaltbild der Leistungskomponenten

Zur Netzanbindung kommt eine Siemens Standardkomponente zum Einsatz (SINAMICS Active-Line-Module).

Alle anderen Funktionalitäten sind nicht als Standardkomponenten verfügbar und werden im Rahmen dieses Projekts unter Laborbedingungen realisiert und verifiziert.

Die folgenden Komponenten werden realisiert:

- Potential-Trennstufe als Serienresonanzwandler
- Hoch/Tiefsetzsteller zur Batterie-Anbindung
- Hoch/Tiefsetzsteller zu PV-Anbindung
- Steuer/Regel Einheit
-

3.3.1 Netzanbindung

Die Siemens Standardkomponente SINAMICS Active-Line-Module (ALM), bestehend aus einem Wechselrichter in IGBT B6-Brückenschaltung, wird als Netzeinspeisekomponente verwendet. Für den Versuchsaufbau wird keine ENS in das System integriert.

3.3.2 Steuer- Regeleinheit

Zur Ansteuerung und Regelung der Leistungskomponenten und Kommunikation mit allen Systemteilnehmern wird eine Steuer/Regeleinheit auf Basis des Signalprozessors TMS320 von Texas Instruments entwickelt. Dieser Controller verfügt über die benötigten Schnittstellen RS232 und CAN-Bus und stellt ausreichend Prozessorleistung zur Ansteuerung der Leistungselektronik (sowohl für konventionelle IGBT-Technik als auch für SiC-Treiber) zur Verfügung. Das nachfolgende Bild zeigt ein Blockdiagramm der Hauptkomponenten.

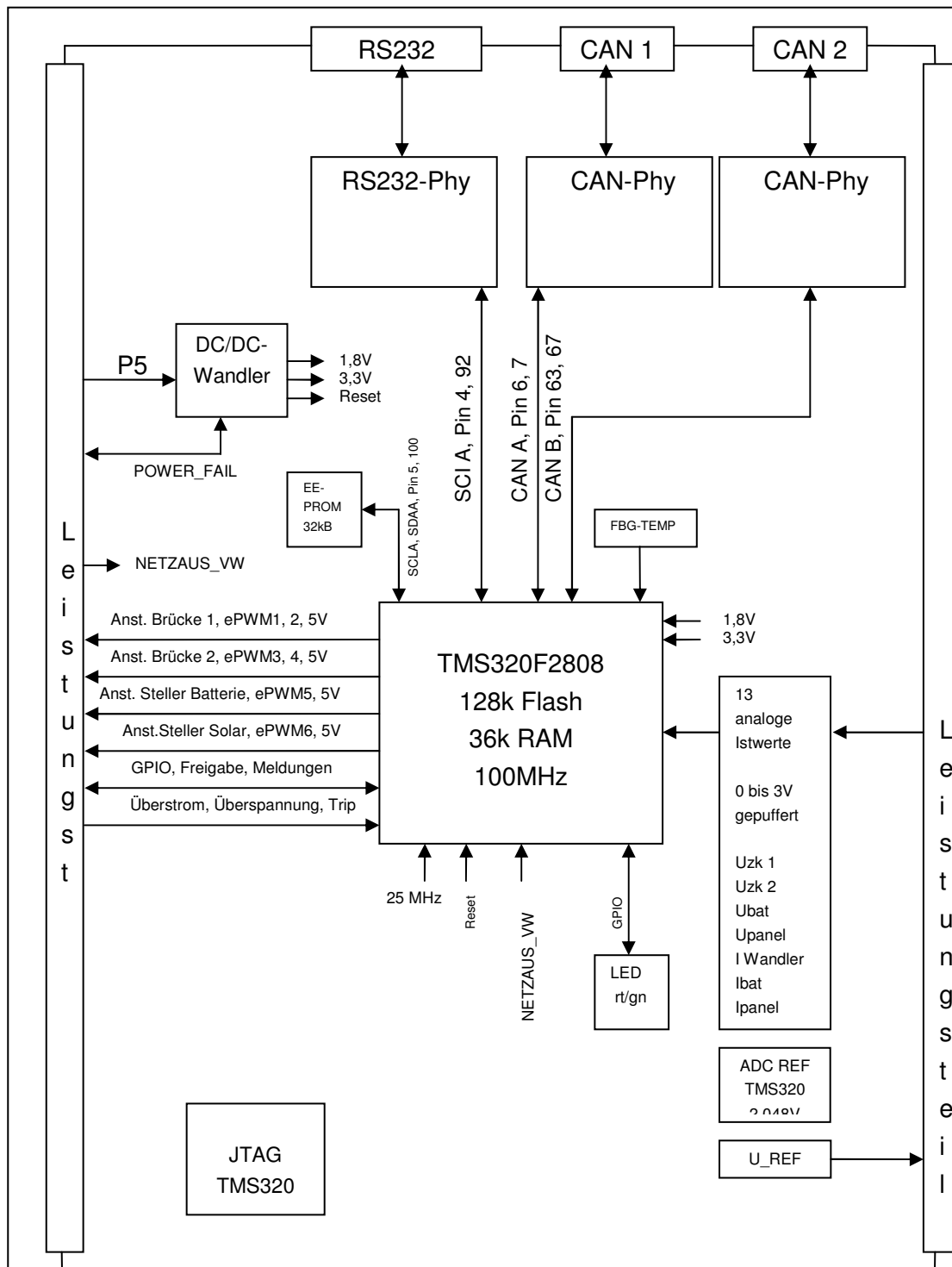


Abbildung 5: Blockschaltbild des DSP Controllers

Die folgenden Abbildungen zeigen das dahinter liegende Regelungskonzept, sowie das Userinterface der Software, welche zur Steuerung des Versuchsaufbaus dient.

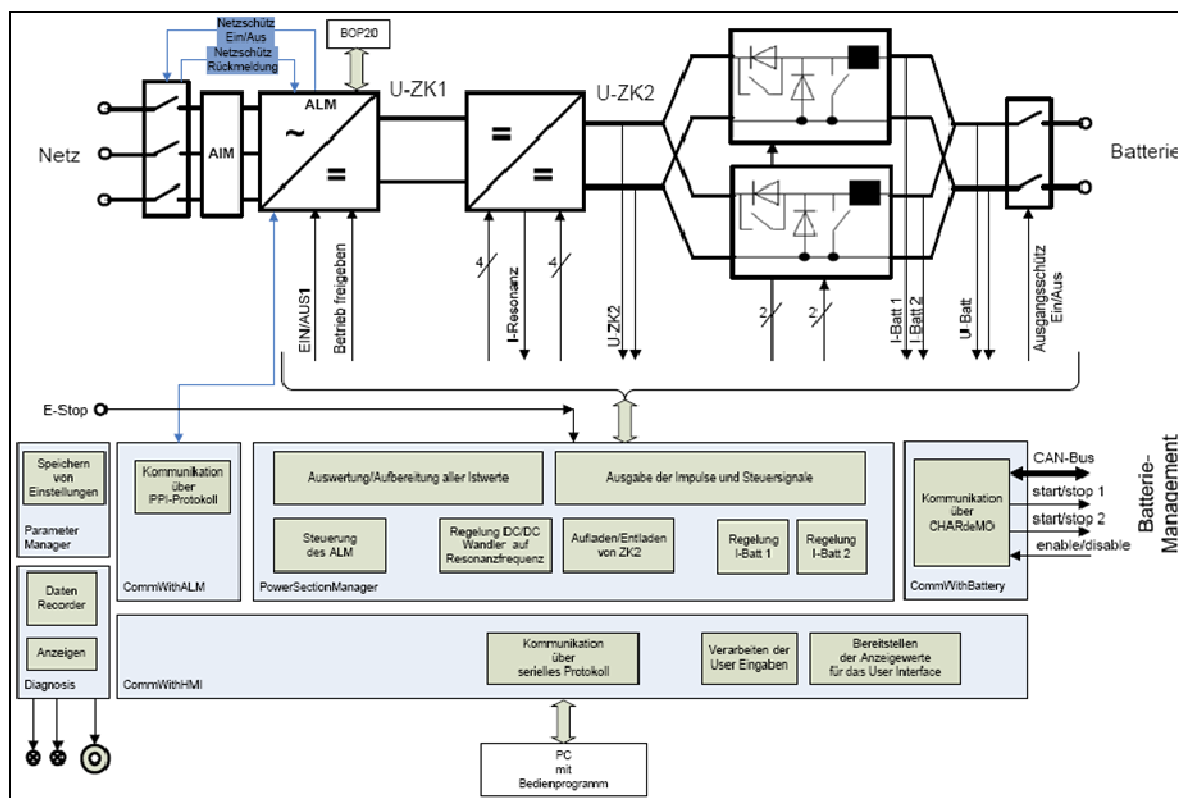


Abbildung 6: Regelungsstruktur, Software Konzept

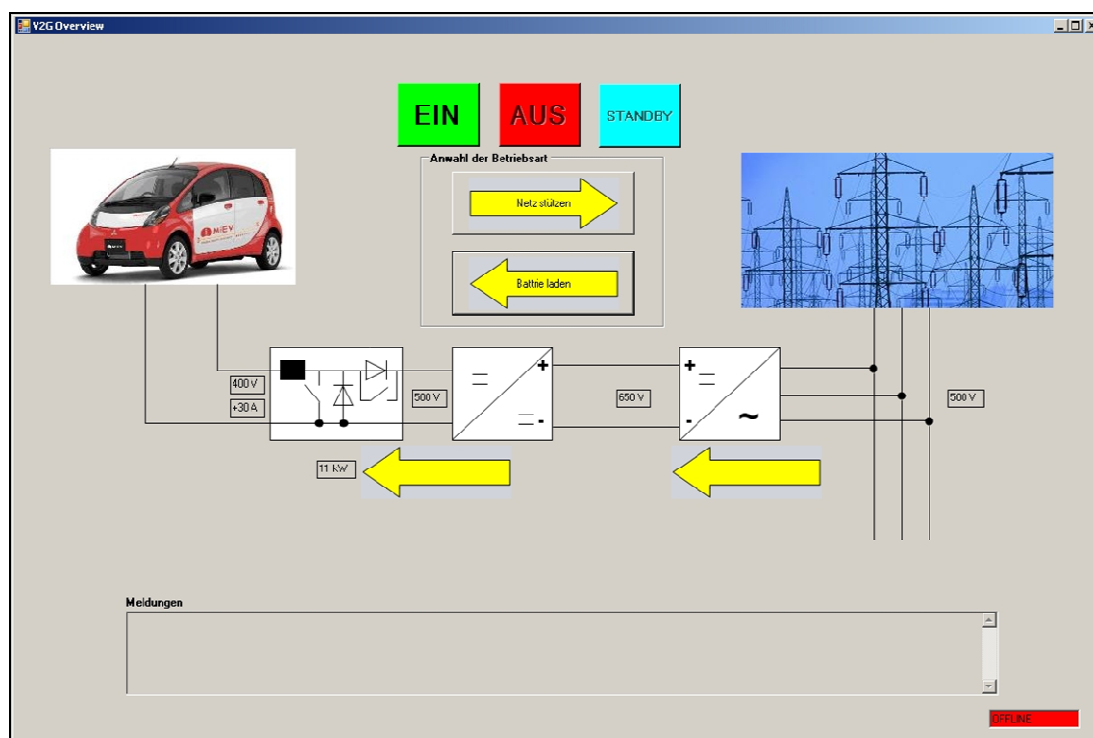


Abbildung 7: Userinterface zum Versuchsaufbau

3.3.3 Potentialtrennung

Grundsätzlich basiert die Potential-trennende Stufe auf einem bidirektionalen Serienresonanzwandler, welcher in einer Vollbrückentopologie ausgeführt wird. Diese Topologie ermöglicht höhere Schaltfrequenzen bei weiterhin guten Wirkungsgrad, da bei nahezu Stromnulldurchgang geschaltet wird. Aus diesem Grund kann in dieser Stufe nicht geregelt werden. Die Aussteuerung beträgt nahezu 100 % wobei Totzeiten im Bereich einer μs einzuhalten sind.

Technische Eckdaten Bidirektionale Stufe:

- Leistung der DC/DC-Stufe: 16 kW
- Eingangsspannung: 650 V
- Ausgangsspannung: 450 V
- Schaltfrequenz: 43 kHz
- Leistungsschalter: IGBT-Technik

Das nachfolgende Blockschaltbild zeigt die Hauptkomponenten der Leistungselektronik und der Treibereinheiten.

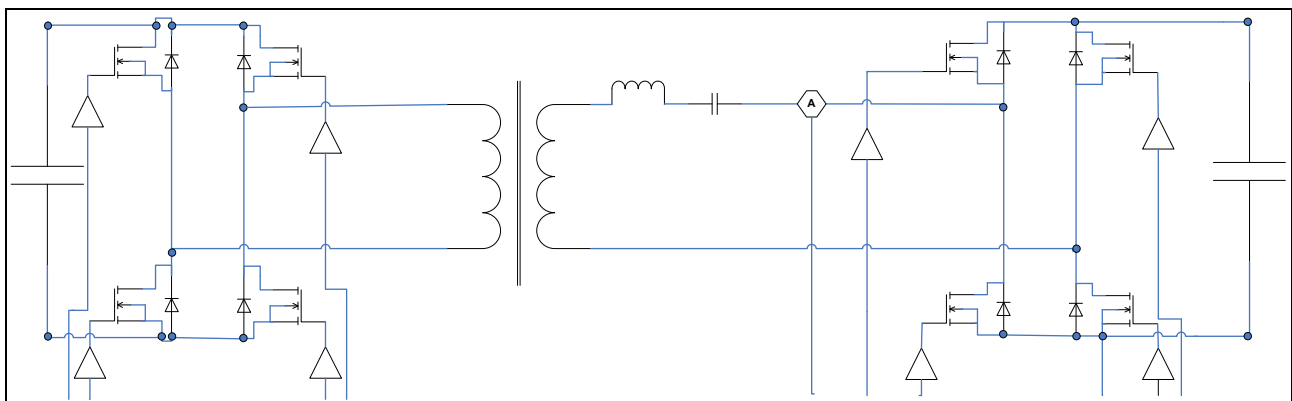


Abbildung 8: Blockschaltbild der Potentialtrennung - Serienresonanzwandler

3.3.4 Leistungsstufe zur Anbindung der Batterie

Die Leistungsstufe wird als bidirektionaler Hoch/Tiefsetzer, „interleaved“ (zweistufig, 180 ° phasenversetzt) konzipiert.

Technische Daten

- Hochsetzsteller in Richtung Netz wirkend
- Tiefsetzsteller in Richtung Batterie wirkend
- Ausgangsspannung 200 – 450 V DC
- Ausgangsstrom max. 46 A
- Ausgangsspannung Welligkeit < 5 V „Spitze-Spitze“
- Ausführungsvarianten:
 - Schaltfrequenz: 43 kHz, Leistungsschalter: IGBT-Technik
 - Schaltfrequenz: 43 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik
 - Schaltfrequenz: 150 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik

Das nachfolgende Blockschaltbild zeigt Hauptkomponenten der Leistungselektronik und Treibereinheiten.

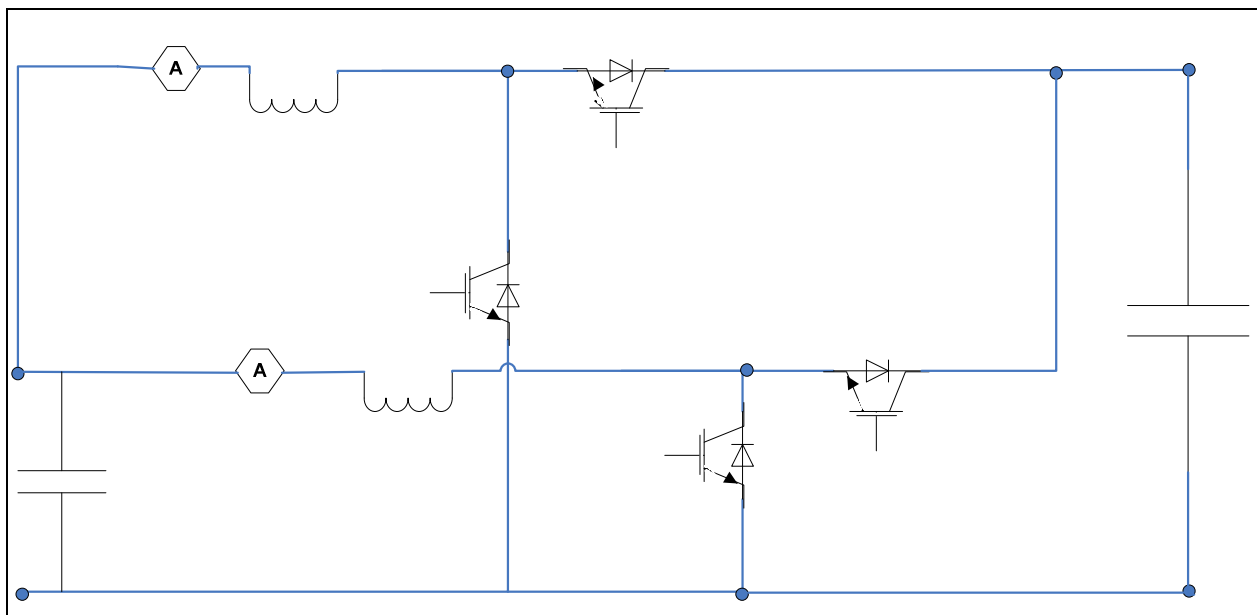


Abbildung 9: Blockschaltbild des Hoch/Tiefsetzstellers - interleaved

3.3.5 Leistungsstufe zur Anbindung des PV-Systems

Die Leistungsstufe zur Einbindung des PV-Feldes in das Gesamtsystem, ist so zu dimensionieren, dass die PV-Nennspannung möglichst wenig von der Systemzwischenkreisspannung abweicht. Dadurch wird ein besserer Wirkungsgrad erreicht. Weiter kann durch geeignete Wahl der PV-Felder eine Stufe (Hoch- oder Tiefsetzsteller) oder je nach Konfiguration sogar die ganze Anpassereinheit eingespart werden. Wird eine Anpasserschaltung benötigt, so kommt die unten abgeführte Topologie zum Einsatz.

Technische Daten:

- Ausgangsspannung 400 – 800 V DC
- Ausgangsstrom max. 50 A
- Ausgangsspannung Welligkeit < 5 V „Spitze-Spitze“

Das nachfolgende Blockschaltbild zeigt die Hauptkomponenten der Leistungselektronik und der Treibereinheiten.

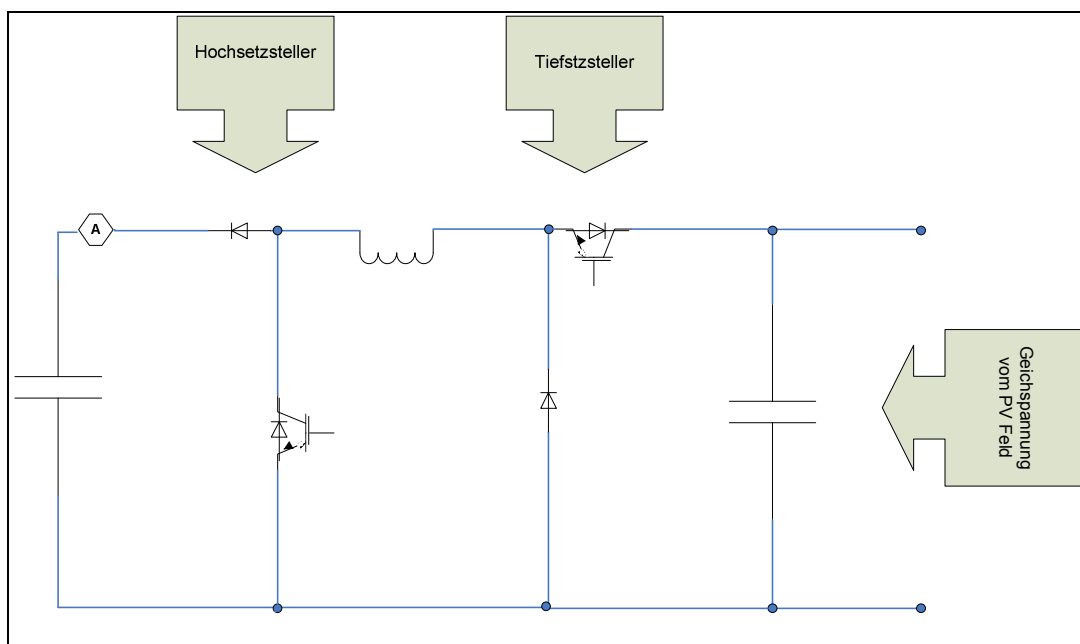


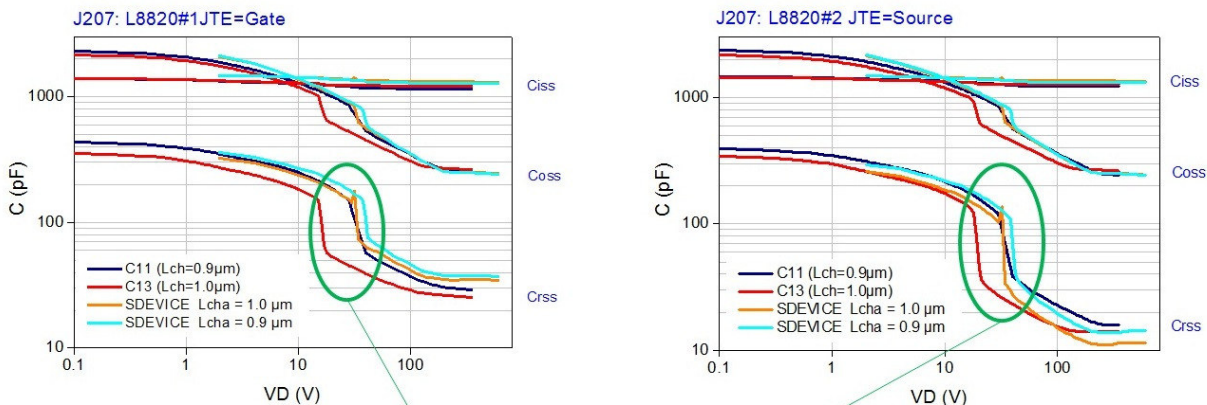
Abbildung 10: Blockschaltbild des Hoch/Tiefsetzstellers zur PV-Anbindung

3.4 Entwicklung von anwendungsspezifischen Leistungshalbleitern

3.4.1 Simulation und Device-Modelle der neuen Technologie

Mit Modellen auf Basis der 1200V SiC-JFET Forschung konnten auf Anhieb Simulationsergebnisse erzielt werden die gute Übereinstimmung mit den ersten gemessenen Bauelementen zeigten. Nur an einzelnen Modellparametern ist eine Nachjustierung erforderlich.

Comparison of simulation and experimental data (J207 / L8820 #1,2)



- Slight difference in voltage between sim and exp.

Abbildung 11: Vergleich von Simulation und experimentellen Daten

3.4.2 Laufzettelerstellung, Einzelprozessentwicklung

1. Fertigungsdurchlauf und Musteraufbau

Durch die im Vergleich zur 1200V Variante deutlich gesteigerte Packungsdichte ergaben sich völlig neue Anforderungen an den Prozess mit der Notwendigkeit neuer Problemlösungen.

Eine entscheidende Herausforderung ergab sich dadurch dass der Metallisierungsprozess am bisherigen Stand der Technik keine zuverlässige Kontaktierung der einzelnen Transistorzellen für die geforderte Stromdichte mehr herstellen konnte. So mussten neue Wege in der Metallabscheidung beschritten werden und es konnte schließlich ein Prozessfenster außerhalb der bisher für beherrschbar gehaltenen Parameterwerte eingestellt werden, mit dem sich eine gute Füllung der Kontakte auf den Transistorzellen erreichen lässt. Es wurden mehrere Versuchslose mit design of experiments (DoE) ausgeführt bei denen ausgewählte Prozessparameter, für jeweils eine kleine Gruppe von SiC-Scheiben des Loses, stufenweise verändert werden um Zielwerte der Prozessparameter experimentell zu bestätigen. Die Abbildungen (Abbildung 12 sowie Abbildung 13) stammen von Scheiben aus einem solchen Versuchslos.

- VA116083#10: DoE AlCu contact hole fill

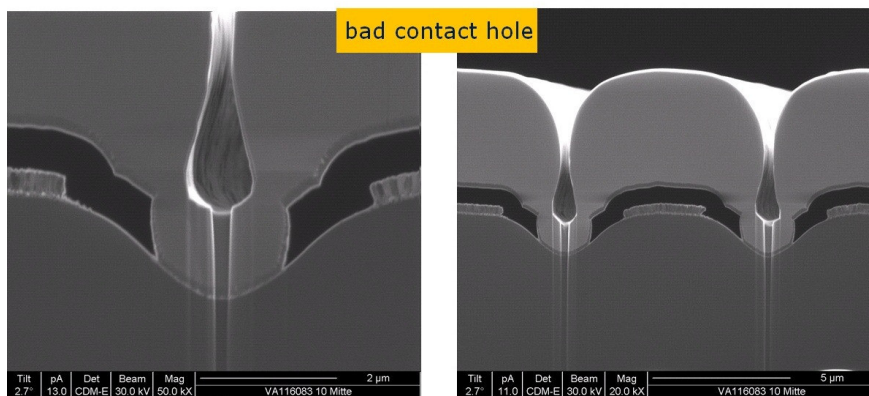


Abbildung 12: Diese Aufnahme zeigt schlechte Aluminium-Kantenbedeckung in den Kontakten auf Scheibe No 10

■ VA050749#06: DoE AlCu contact hole fill

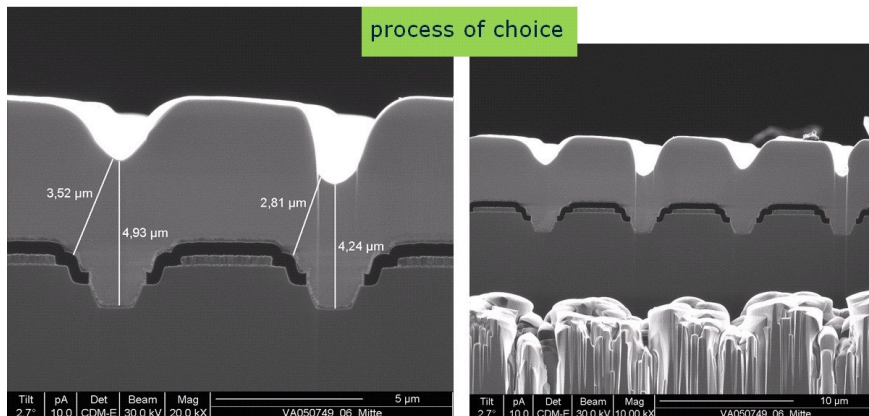


Abbildung 13: Auf Scheibe No 6 bestätigten einwandfreie Kontakte die Zielvariante des Metallisierungsprozesses

Allererste Erprobungsmuster zur Überprüfung der Prozessentwicklung wurden bereits in Plastikgehäusen aufgebaut und bei Infineon intern untersucht.

Auf Basis der Device-Simulationen wurden 650V SiC-JFET Schalter entwickelt. Aus dem 3. Lernzyklus wurden Demonstratoren des 650V SiC-JFET mit 20mOhm charakterisiert und erste Muster im Gehäuse TO220 aufgebaut (siehe Abbildung 14).

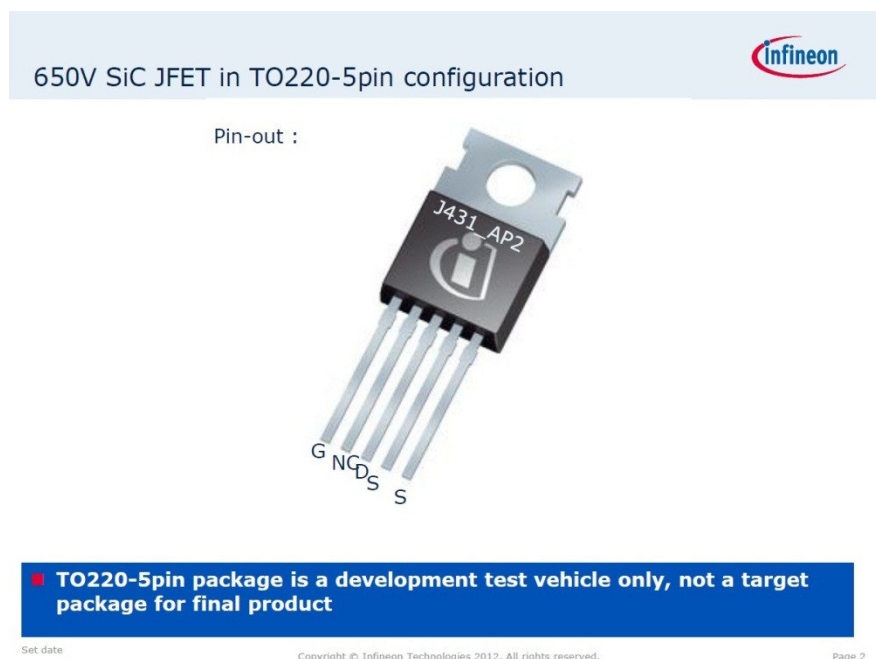


Abbildung 14: Demonstratoren im Plastikpackage für die Verifikationsmessungen

Diese Muster dienen zur erweiterten Erprobung im Labor und in der V2G Konverter-Topologie. Um die Ansteuerung (siehe Abbildung 15) dieser neuartigen Halbleiterschalter in einfacher Weise wie bei handelsüblichen MOSFETs zu ermöglichen wurde ein maßgeschneidertes Treiberkonzept entwickelt. Das Treiberkonzept übernimmt die Aufgabe das Gate bezogen auf schwimmende Potentiale auszusteuern welche in den Anwendungsschaltungen dieser SiC JFET – Bauelemente auftreten. Der Treiber selbst wird einfach mit einem massebezogenen Signal angesteuert.

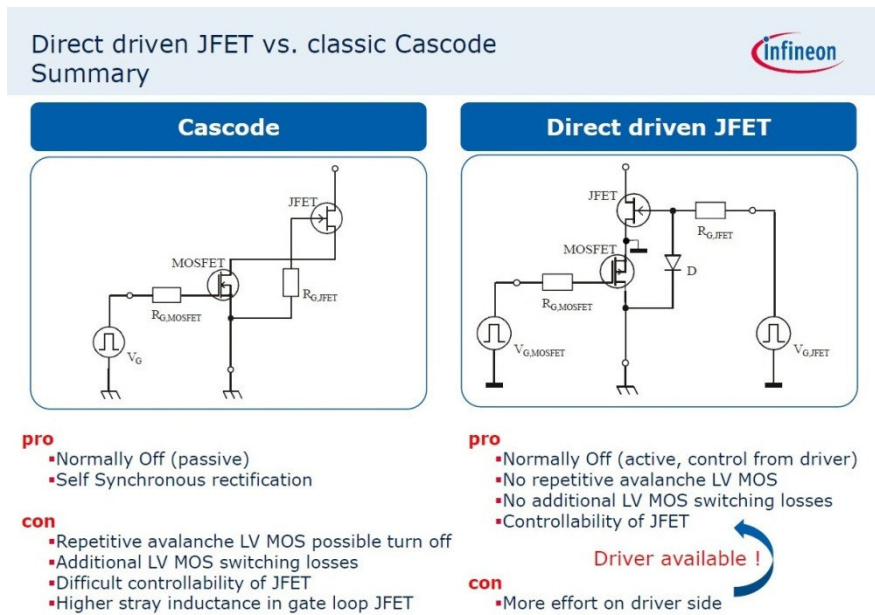


Abbildung 15: Konzept für die Ansteuerung

3.4.3 Charakterisierung und Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Die notwendigen Qualifikationsuntersuchungen sind definiert und planmäßig gestartet. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit über die gesamte Lebensdauer der Bauelemente sind Erkenntnisse aus Langzeittests notwendig welche auch unter Ausnutzung sämtlicher Beschleunigungsfaktoren (erhöhte Temperatur, verstärkte Belastung) noch erhebliche Zeit in Anspruch nehmen.

3.4.3.1 Elektrische Qualifikationsuntersuchungen

Aus dem Portfolio der elektrischen Tests seien die HTRB-Untersuchungen erwähnt, welche bereits erfolgreich absolviert wurden, sowie die Temperaturzykeltests (TC) bei denen einzelne Driften aufgetreten sind - die betroffenen Bauteile werden nun analysiert um entsprechende Korrekturmaßnahmen einzuleiten.

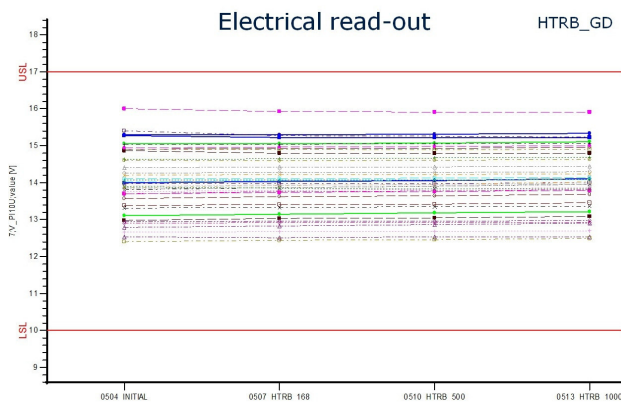


Fig. 1: Die Parameterwerte bleiben im HTRB-Test stabil

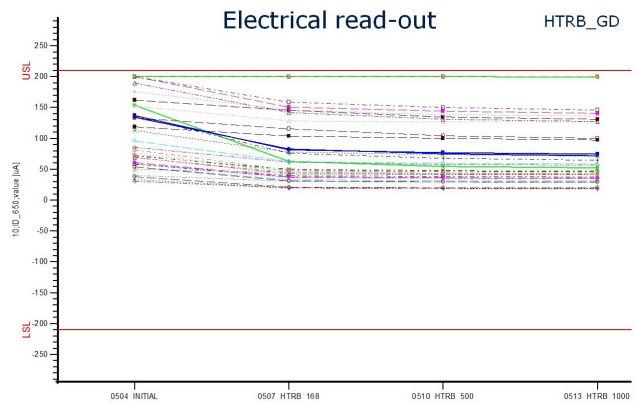


Fig. 2: Die Parameterwerte bleiben im HTRB-Test stabil

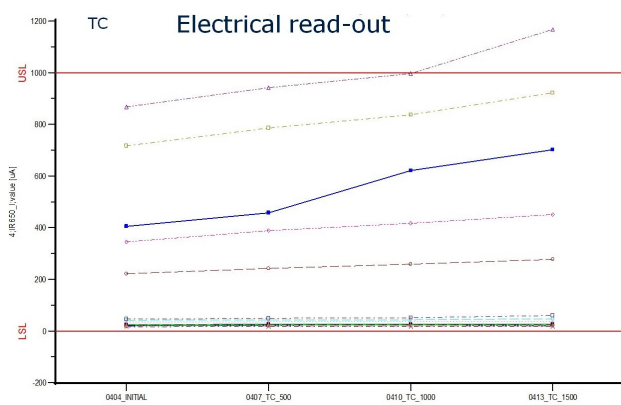


Fig. 3: Drifteffekte im TC-Test

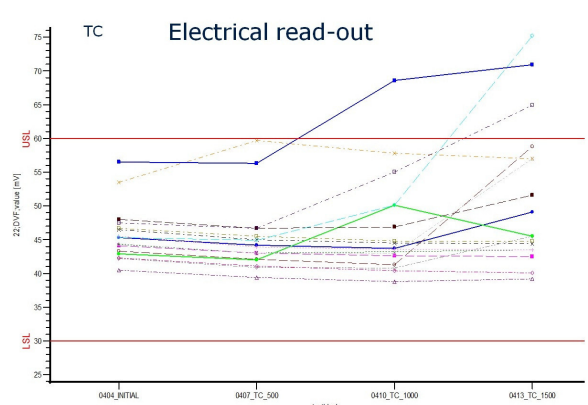
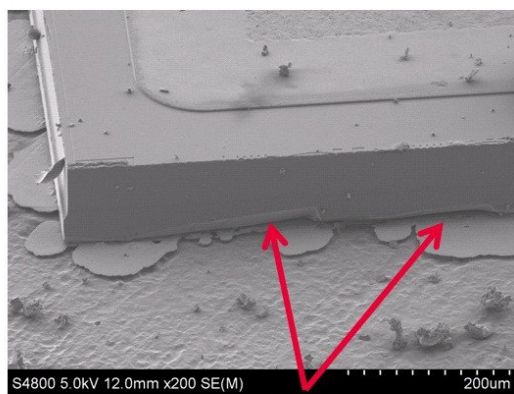


Fig. 4: Drifteffekte im TC-Test

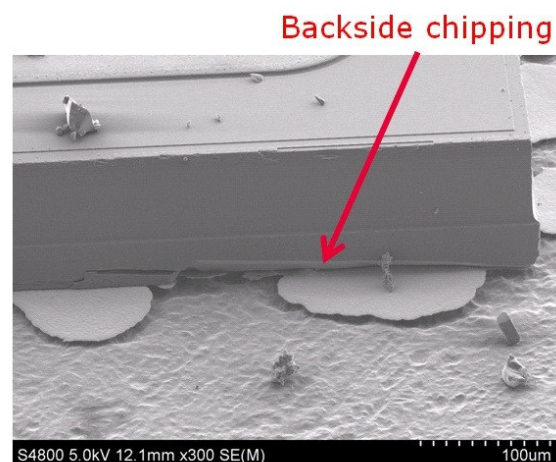
3.4.3.2 Montagetests und mechanische Qualifikationsuntersuchungen

Aufgrund der enormen Härte des Grundmaterials Siliziumkarbid gibt es auch bei der Montage der Bauelemente ins Gehäuse vermehrt mechanische Probleme zu lösen. Eines davon entsteht aus dem „backside chipping“ genannten Effekt, bei dem sich Materialteile entlang der Sägekante von der Rückseite des Bauelementes lösen. Der Sägeprozess ist bei diesem extrem harten Material, das auch als industrielles Schleifmittel in Verwendung ist, besonders schwer einzustellen. DoE's zum Sägeprozess sind geplant

Dieser „backside chipping“ Effekt ist in den nachfolgenden Bildern zu sehen.



Backside chipping



Backside chipping

Die Musterserie von Prototypen wurde charakterisiert und die Messergebnisse entsprechen im Wesentlichen den Voraussagen der Simulationen (in Abbildung 16 ein Auszug der Messergebnisse).

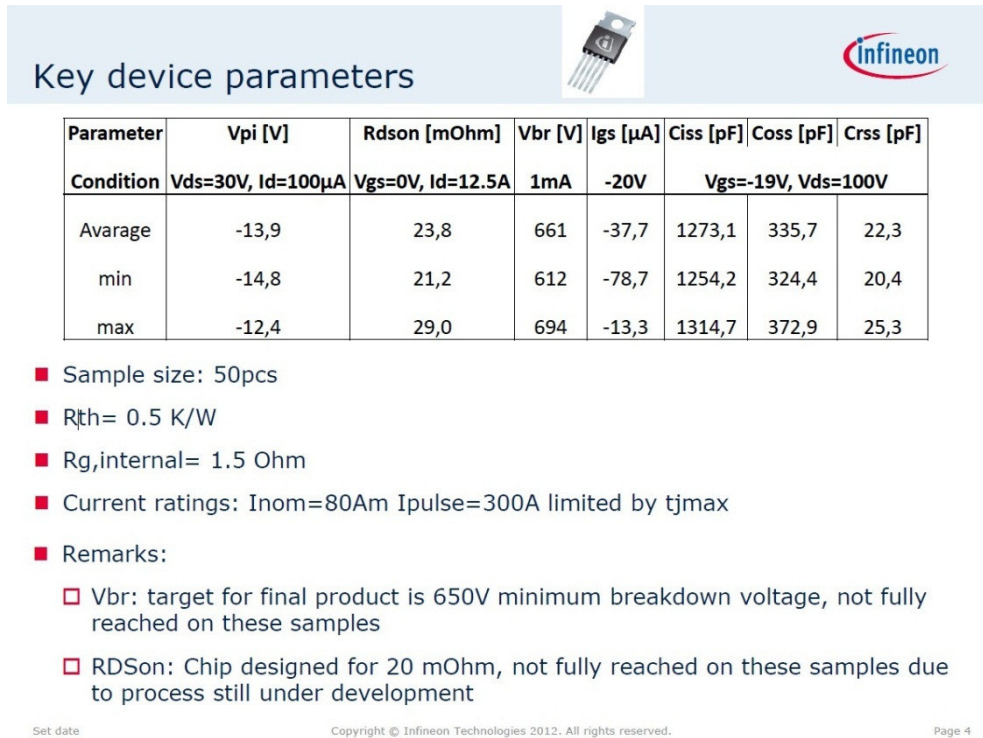
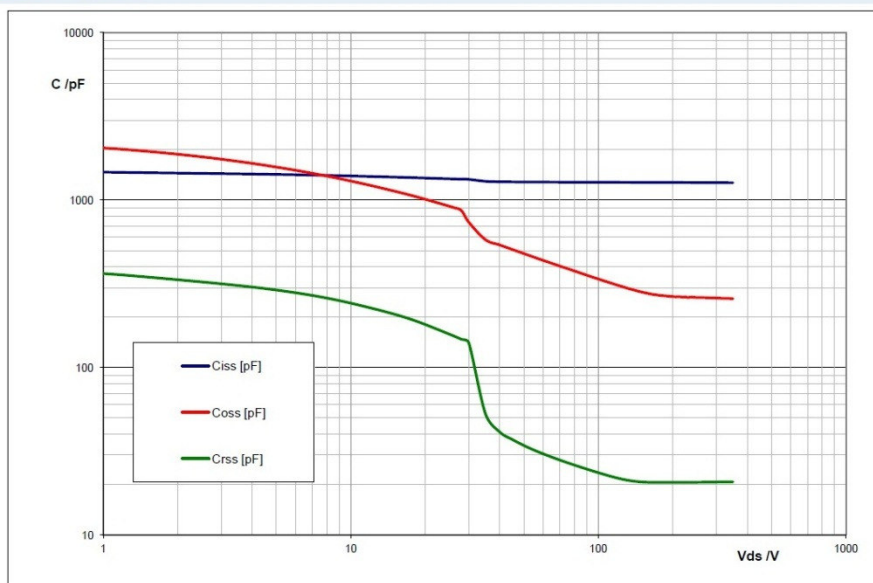


Abbildung 16: Auszug der Charakterisierungsergebnisse

Zur Produktqualität selbst existieren noch keine verlässlichen Daten. Im Bereich der Produktionsanlagen laufen noch Umstellungen (von 4“ auf 6“ – Fotolithographie, Stepper) welche sowohl Fertigungsparameter wie Produktparameter beeinflussen und dadurch Nachjustierungen erfordern werden. Für eine produktspezifische Zuverlässigkeitsuntersuchung ist es daher zu früh.

Aus den Erfahrungen die wir mit SiC Dioden und der 1200V SiC JFET Variante gemacht haben ist ein Qualitätsniveau zumindest im Bereich existierender 650V Produkte (IGBT, MOSFET) zu erwarten. Bei der Höhenstrahlungsfestigkeit und Robustheit gegenüber Temperaturwechselbeanspruchungen zeichnen sich deutlich bessere Werte ab als jene die von IGBTs und MOSFETs erreicht werden.

Typical device capacitances 20 mOhm 650V JFET



Set date

Copyright © Infineon Technologies 2012. All rights reserved.

Page 5

Abbildung 17: Auszug der Charakterisierungsergebnisse, Kapazitätsverläufe über V_(ds)

3.5 Evaluierung und Simulation des Gesamtsystems

3.5.1 Wirkungsgrad-Vergleichsmessung

Im Rahmen der Wirkungsgrad-Vergleichsmessung wurde die Ausgangsstufe isoliert von den weiteren Elementen vermessen, um die Aussagekraft des Vergleiches zwischen IGBT- und SiC- Transistoren möglichst hoch zu halten. D.h. es wird nur die DC/DC-Ausgangsstufe betrachtet (nicht die Potentialtrennung und auch nicht die Einspeisung).

3.5.1.1 Ergebnisse der Wirkungsgrad-Messung

3.5.1.1.1 Wirkungsgradmessung „IGBT“

IGBT Type: HGTG30N60A4D

Es wurden 2 Wirkungsgradmessungen durchgeführt:

- 41,5 kHz im Boost-Betrieb
- 50 kHz im Buck- Betrieb

Bei der Wirkungsgradmessung bei 41,5kHz im Boost-Betrieb wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 99,15% erreicht. Im Boostbetrieb war die Eingangsspannung bei 350 V DC (konstant) und die Ausgangsspannung im Bereich von 400 V DC bis 500 V DC.

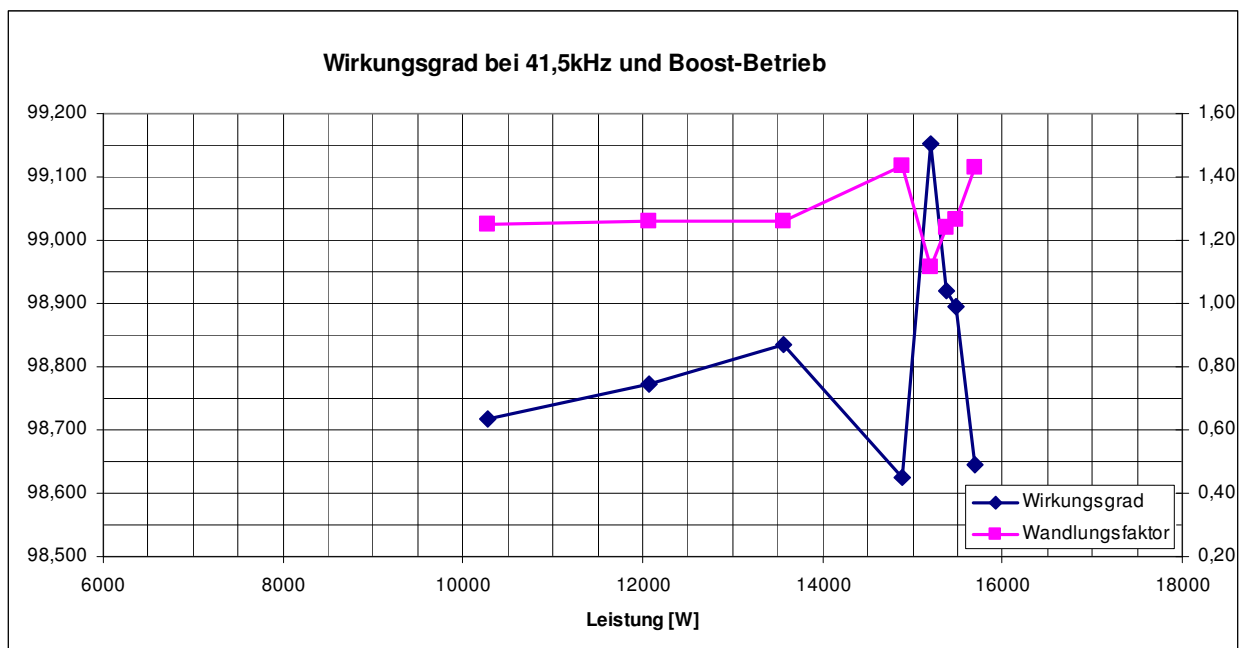


Abbildung 18: Wirkungsgradmessung der IGBTs bei 41,5kHz und Boost-Betrieb

Bei der Wirkungsgradmessung bei 50kHz im Buck-Betrieb wurde ein maximaler Wirkungsgrad von 99,35% erreicht. Im Buck-Betrieb war die Ausgangsspannung bei 350 V DC (konstant) und die Eingangsspannung im Bereich von 400 V DC bis 500 V DC.

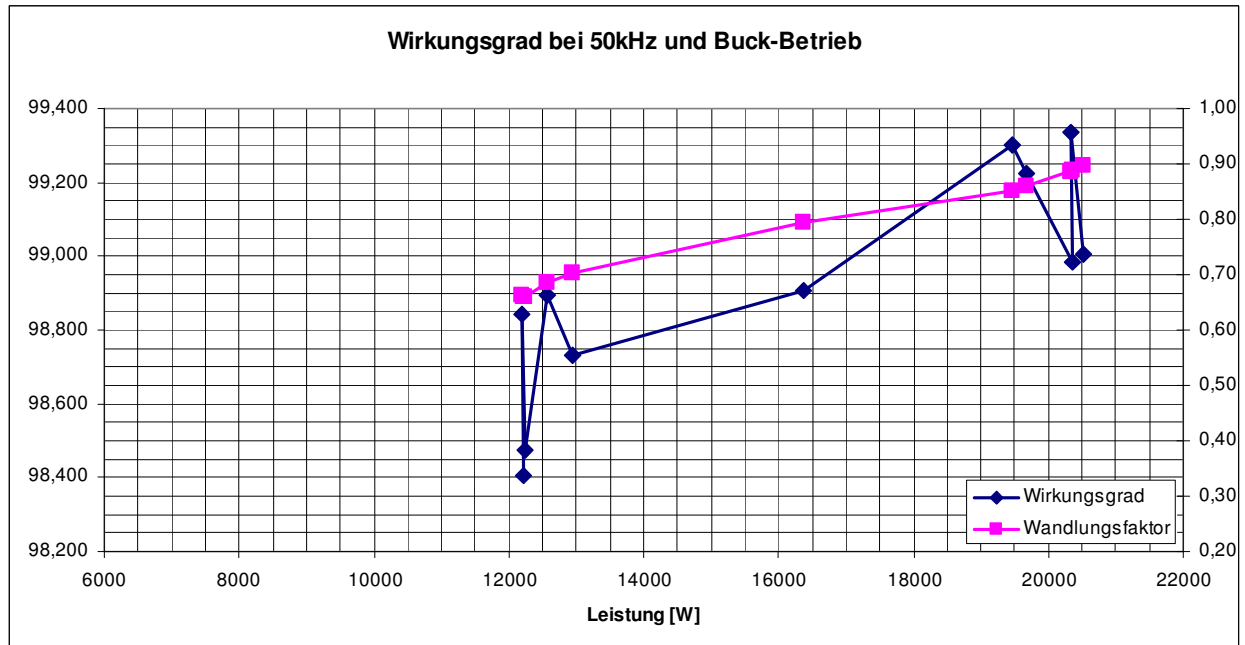


Abbildung 19: SiC-Treiberschaltung und Anordnung der Kaskode

3.5.1.1.2 Wirkungsgradmessung „SiC“

SiC J-FET Type: 650V SiC JFET 20mOhm Design TO220-5pin

Es wurden 8 Wirkungsgradmessungen durchgeführt:

- Schaltfrequenz: 50 und 70 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik und mit 165µH Drossel (im Boost-Betrieb)
- Schaltfrequenz: 120 und 150 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik und mit 40µH Drossel (im Boost-Betrieb)
- Schaltfrequenz: 50 und 70 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik und mit 165µH Drossel (im Buck-Betrieb)
- Schaltfrequenz: 120 und 150 kHz, Leistungsschalter: SiC-JFET Technik und mit 40µH Drossel (im Buck-Betrieb)

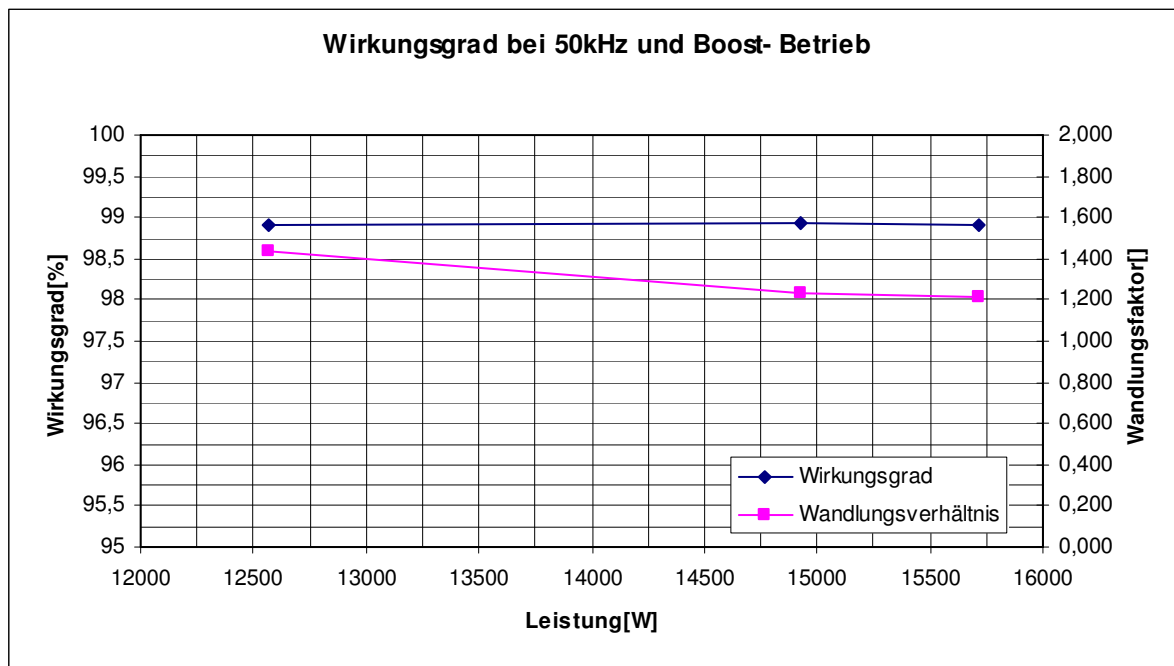


Abbildung 20: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 50kHz und Boost-Betrieb

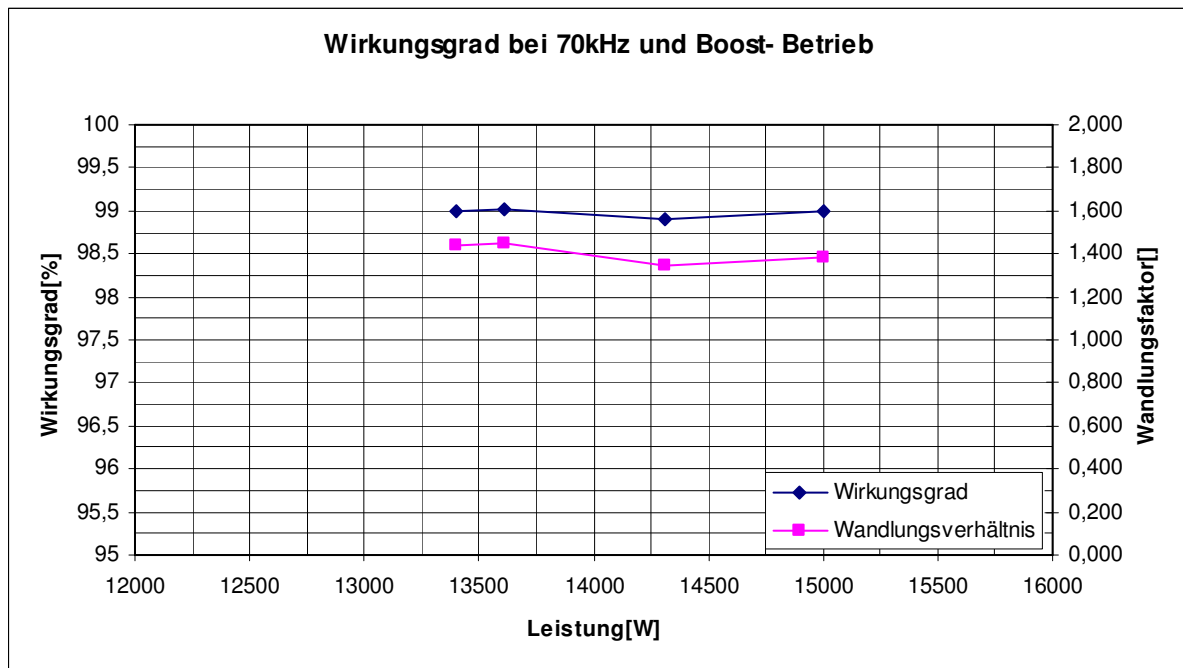


Abbildung 21: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 70kHz und Boost-Betrieb

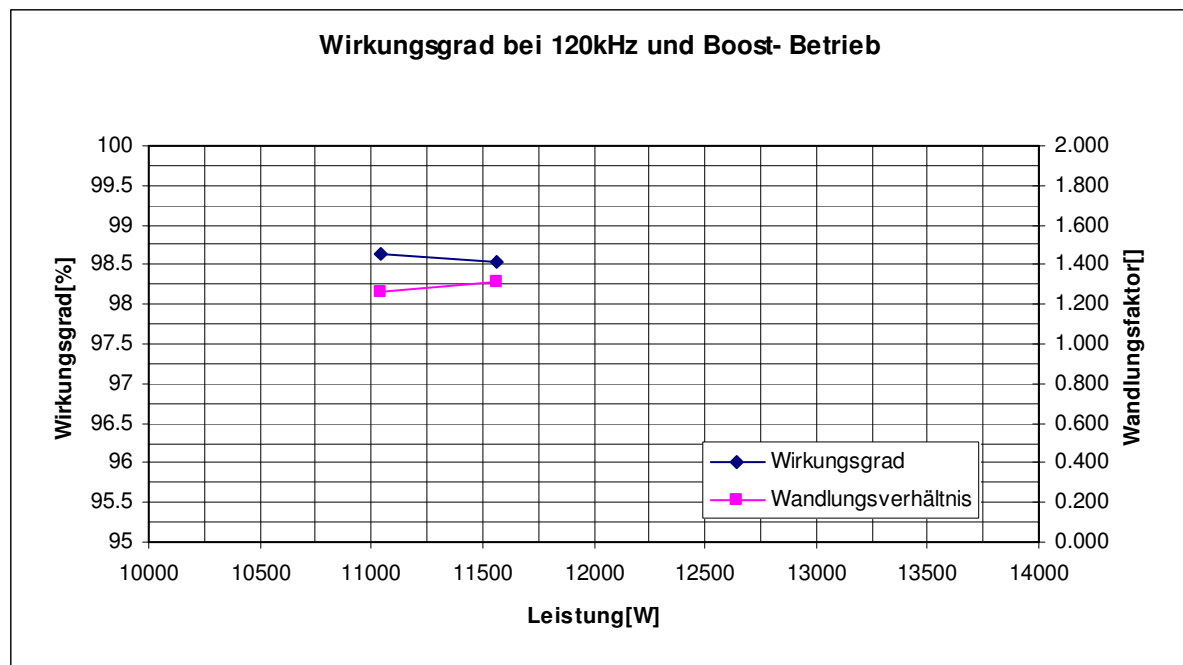


Abbildung 22: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 120kHz und Boost-Betrieb

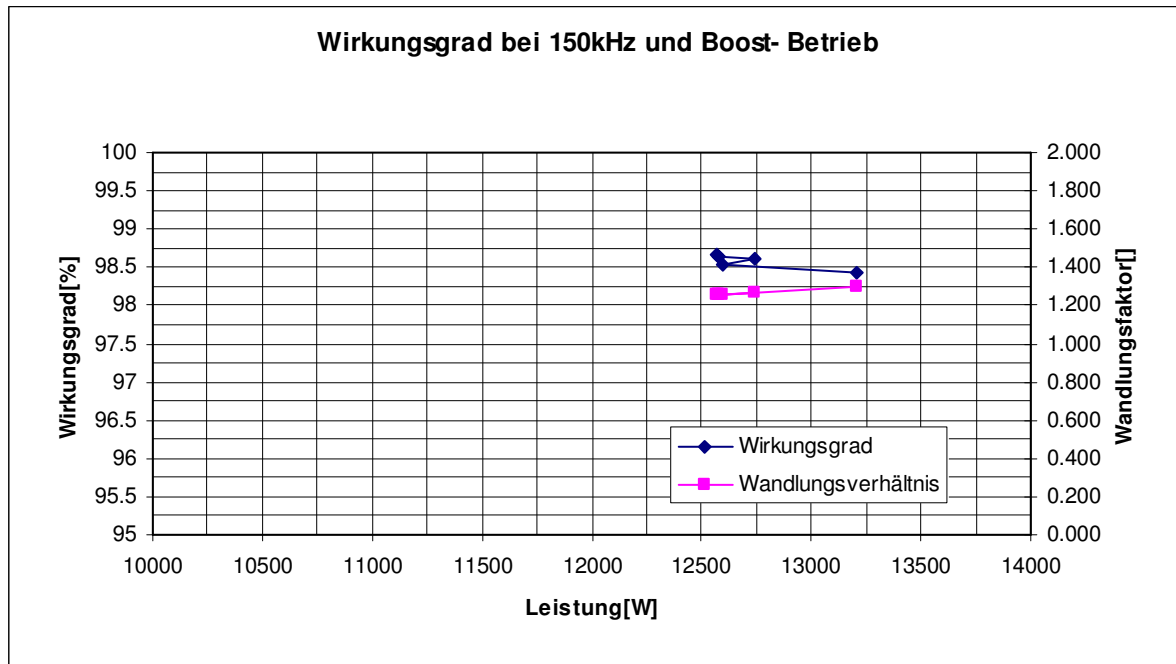


Abbildung 23: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 150kHz und Boost-Betrieb

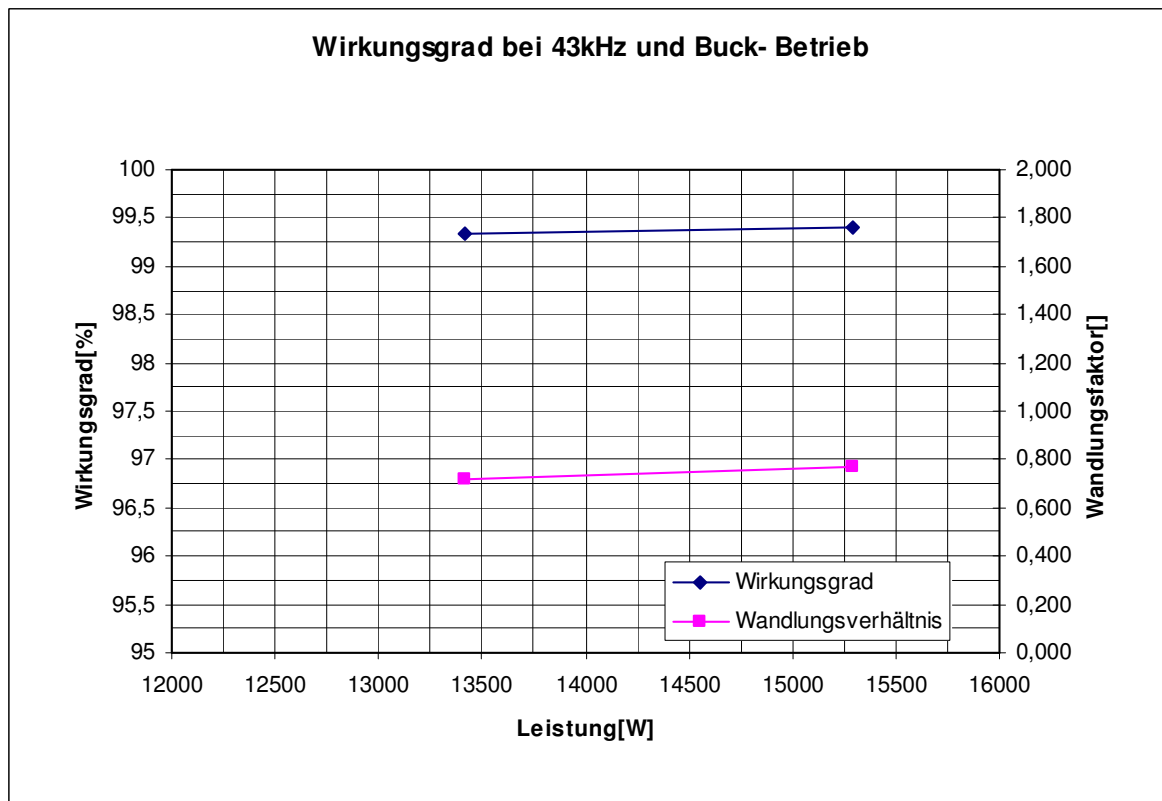


Abbildung 24: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 43kHz und Buck-Betrieb

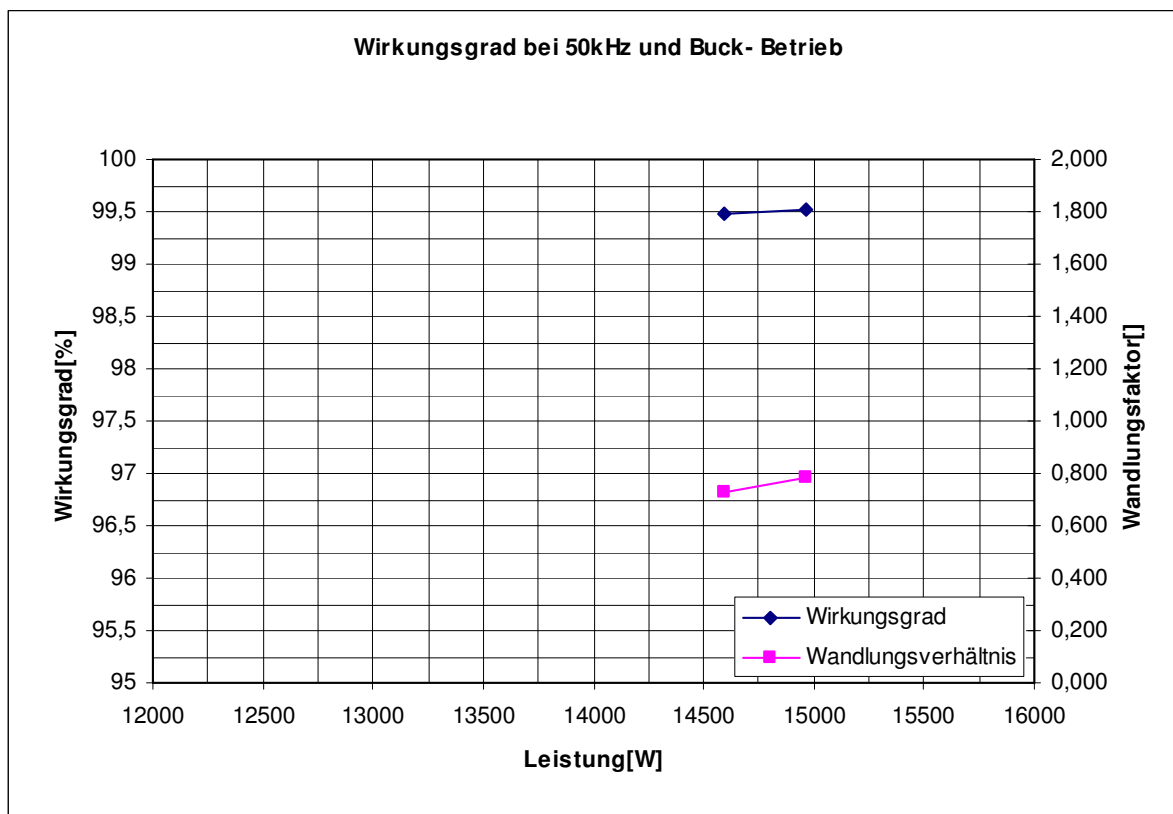


Abbildung 25: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 50kHz und Buck-Betrieb

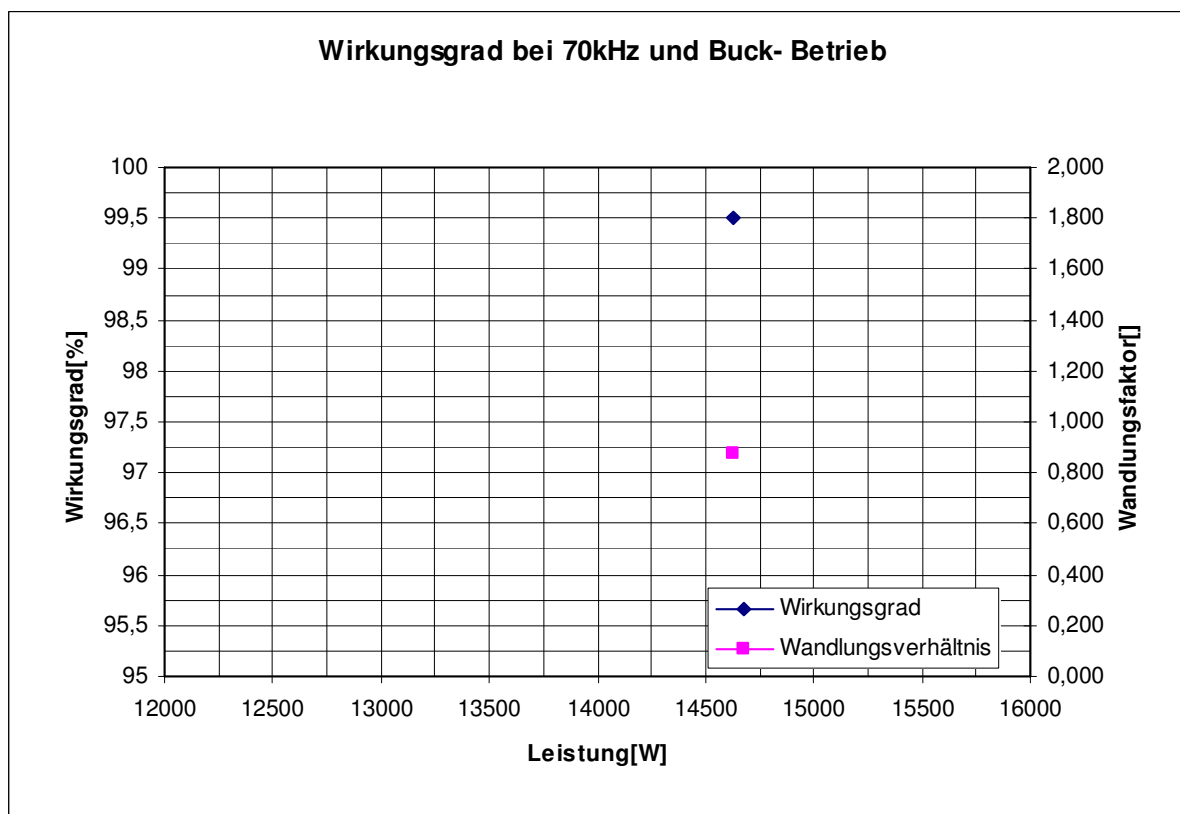


Abbildung 26: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 70kHz und Buck-Betrieb

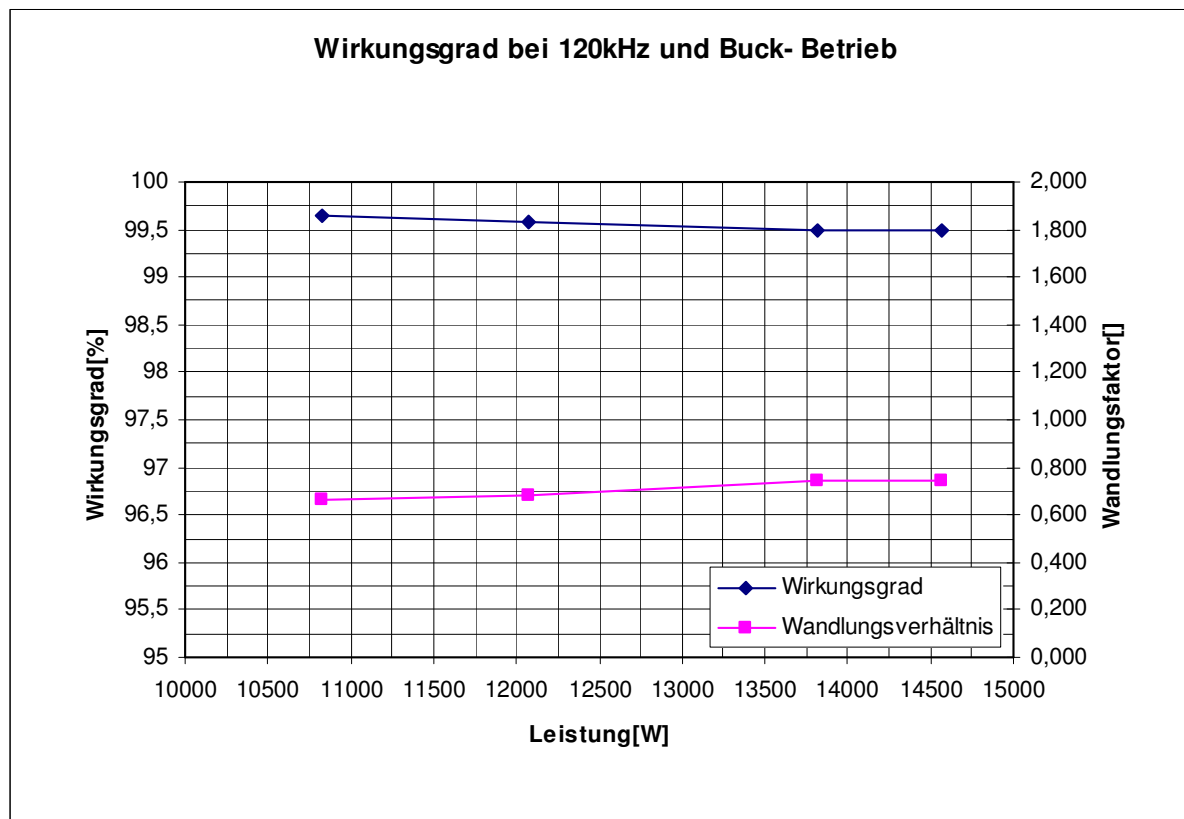


Abbildung 27: Wirkungsgradmessung der SIC J-FETs bei 120kHz und Buck-Betrieb

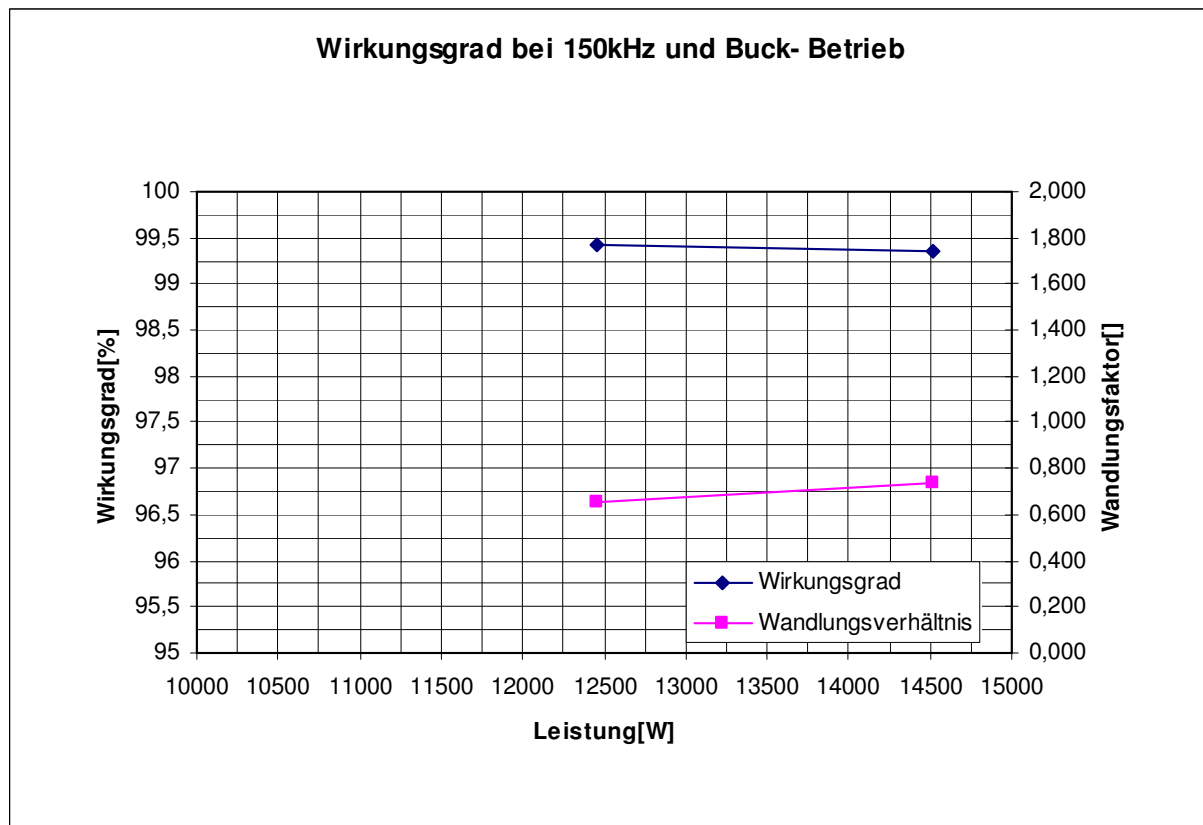


Abbildung 28: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 150kHz und Buck-Betrieb

3.5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Wirkungsgrad-Vergleichsmessung zeigt, dass die Schaltverluste beim SiC J-FET für den Wirkungsgrad der Schaltung eine untergeordnete Rolle spielen. Der optimalste Betriebspunkt bezüglich des Wirkungsgrades liegt bei einer Schaltfrequenz von 120kHz. Es zeigt sich, dass die Vorteile des SiC J-FETs erst wirklich im Bereich höherer Schaltfrequenzen tragend werden. Bei niedrigen Schaltfrequenzen spielen die Verluste in den Drosseln bzw. die Leitverluste eine übergeordnete Rolle und daher lässt sich der Wirkungsgrad im Vergleich zum IGBT nicht deutlich verbessern.

Ein weiterer Vorteil der SiC J-FETs im Vergleich zum IGBT liegt in der Miniaturisierung der passiven Bauteile (Drosseln und Kondensatoren). Da wie bereits oben erwähnt die Schaltfrequenz im Vergleich zum IGBT ohne Wirkungsgradeinbußen deutlich gesteigert werden kann.

Im Vergleich kann man hier eine Größenrelation der Hoch-/ Tiefsetzsteller Drossel heranziehen:

Drossel für hohe Schaltfrequenzen (120kHz bis 150kHz):

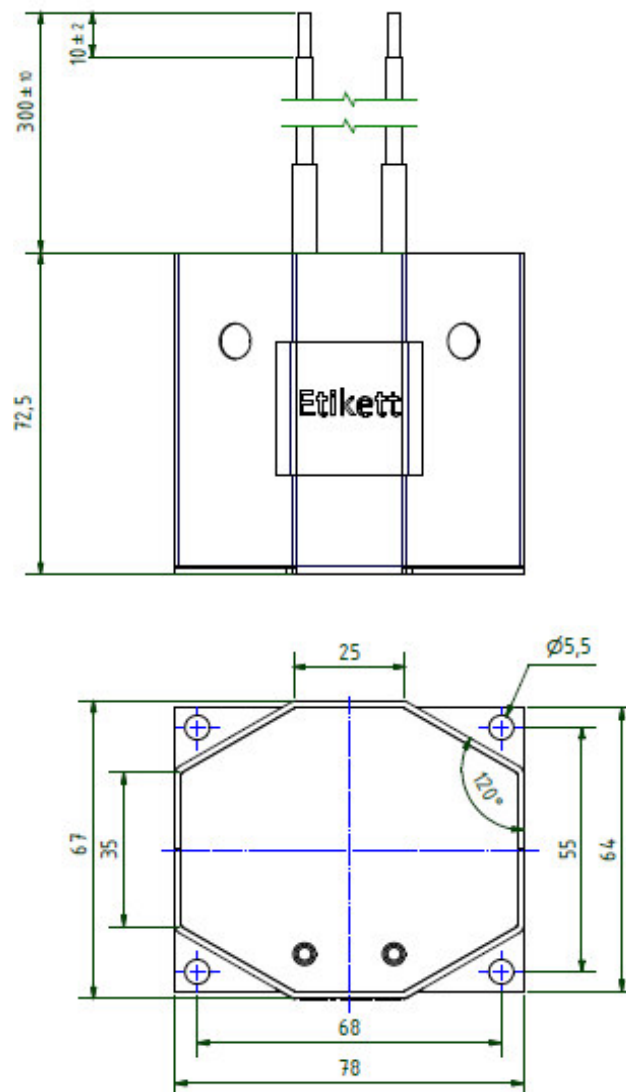


Abbildung 29: Drossel für hohe Schaltfrequenzen (120kHz / 150kHz)

Drossel für niedrige Schaltfrequenzen (40kHz bis 70kHz):

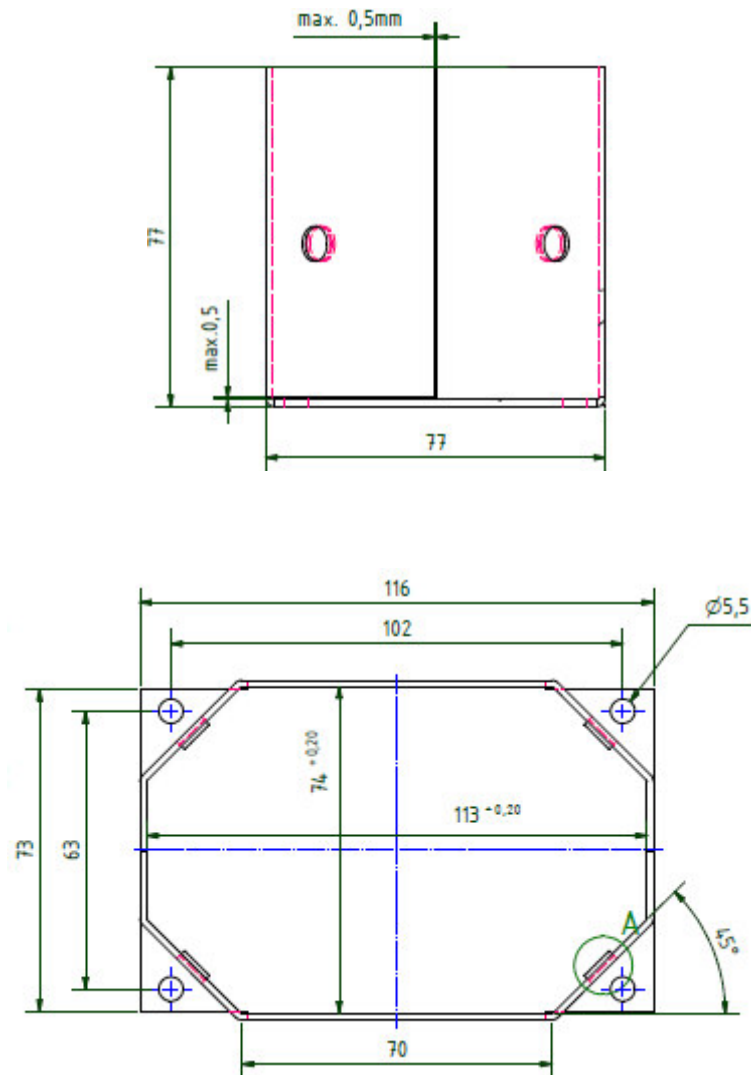


Abbildung 30: Drossel für niedrige Schaltfrequenzen (40kHz / 70kHz)

Das Bauteilvolumen der Drossel für 120kHz bzw. 150kHz beträgt ca. 45% vom Volumen der Drosseln für 40kHz bzw. 70kHz.

Abgesehen von der Bauteilgröße spiegeln sich die Vorteile von SiC in den Kosten der passiven Bauelemente und in der Leistungsdichte des Gesamtsystems wieder.

3.5.2 PHIL Versuchsreihe

Für den V2G Inverter ist die PHIL von großem Interesse da der Inverter mit dieser Methode sowohl AC als auch DC Seitig angesteuert werden kann. Für die PHIL Versuche im Zuge des Projektes wurde beschlossen den V2G Inverter unter Verwendung des im AIT verfügbaren Equipment Sowohl AC als auch DC seitig in die Simulationsumgebung einzubinden.

Dieser Versuchsaufbau ist nach derzeitigem Stand der Technik erstmalig. Soweit dem Projektteam bekannt wurde ein solcher PHIL Aufbau bei dem ein Bidirektionaler Laderegler Beidseitig von einem einzelnen Echtzeitsystem angesteuert wird noch nicht durchgeführt. Auch ein vergleichbares Szenario (z.B. ein PV Wechselrichter der beidseitig vom selben Echtzeitsystem angesteuert wird) konnte nicht gefunden werden. Abbildung 31 zeigt eine Übersicht über den V2G-Inverter PHIL Versuchsaufbau.

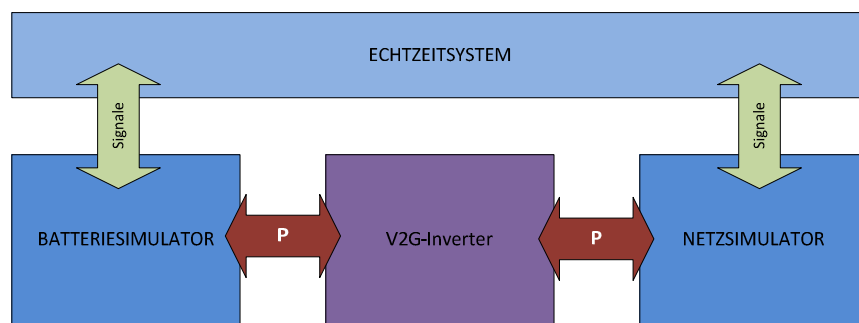


Abbildung 31: Übersicht V2G-Inverter PHIL Versuchsaufbau

Für den V2G-Inverter PHIL Versuchsaufbau werden die folgenden Komponenten benötigt

- Das Echtzeitsystem
- Der Batteriesimulator
- Der Netzsimulator
- Messequipment
- Der V2G-Inverter

Nachfolgend werden diese Komponenten einzeln beschrieben.

3.5.2.1 Stabilitätsuntersuchungen für den V2G-Inverter

Aufgrund des hohen Gefährdungspotentials bei Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulationen muss im Vorfeld der eigentlichen Laborversuche die Stabilität des Versuches gewährleistet werden. Diese Stabilitätsuntersuchungen im Vorfeld des Laborversuches wurden auf einer analytischen Ebene durchgeführt.

Die Stabilitätsuntersuchungen für den V2G-Inverter wurden mithilfe des Nyquist-Stabilitätskriteriums durchgeführt. Das Netz wurde hierfür als lokale Netzimpedanz modelliert. Für die Durchführung des eigentlichen PHIL Versuches gilt es dann die spezifischen Werte für die simulierte Impedanz einzustellen.

Die folgende Abbildung 32 zeigt, dass bei einer typischen Netzimpedanz der V2G-Inverter als Hardware unter Test ein instabiles System erzeugt. Diese Instabilität wird jedoch nicht durch den Inverter ausgelöst, da dieser ja im normalbetrieb stabil operiert, sondern durch den PHIL Versuchsaufbau.

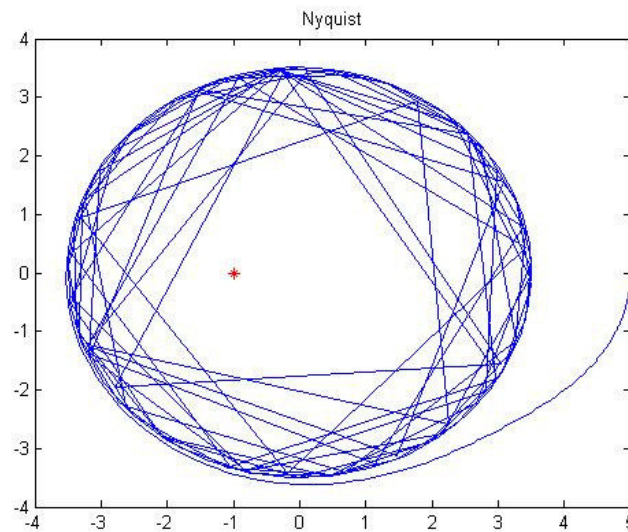


Abbildung 32: Nyquist Plot des V2G-inverter PHIL Versuchsaufbaus ohne Stabilitätsmaßnahmen

Durch die gezielte Anwendung eines sogenannten „Feedback Filters“ kann allerdings das System wieder stabilisiert werden, wie Abbildung 33 zeigt.

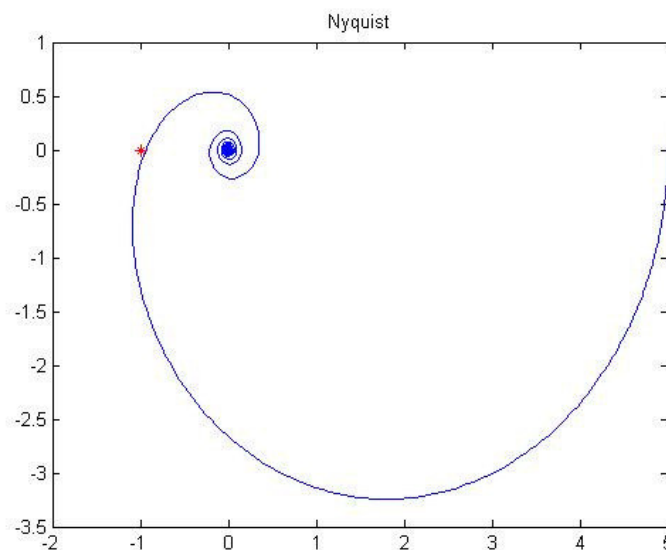


Abbildung 33: Nyquist Plot des Stabilisierten V2G Inverter PHIL Versuchsaufbaus

Aus Abbildung 33 geht hervor, dass der Stabilitätsradius (Abstand zwischen der Nyquist Kuve [blau] und dem Nyquist Punkt [rot]) dennoch sehr klein ist. Das würde bedeuten, dass bei einer Abweichung der realen Bauelemente von der gewählten Modellierung Instabilitäten leicht auftreten können.

Es wurde also beschlossen für die V2G-inverter PHIL Versuche in relativ kleinen Leistungsbereichen zu bleiben um bei einer eventuellen Instabilität das Gefährdungspotential gering zu halten.

3.5.2.2 Durchgeführte PHIL Versuche

Nachfolgend werden die mit dem V2G Inverter Demonstrator durchgeführten PHIL Versuche dokumentiert.

Evalulierung Stabilitätsuntersuchungen:

Um die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen zu evaluieren wurde als erster PHIL Versuch getestet ob das zusammenschließen der Einzelnen Geräte zu einem aufschwingen einzelner Filter führt. Für diesen Versuch wurde der V2G Inverter AC Seitig an den Spitzenberger &Spieß PAS 1000 Leistungsverstärker und DC Seitig an den Batteriesimulator angeschlossen.

Von sehr großer Bedeutung für die weitere Durchführbarkeit eines jeden PHIL Versuches ist es sicherzustellen, dass der Systemstatus ohne Leistungsfluss stabil und sicher ist. Dies ist nicht als gegeben anzunehmen. Die verschiedenen Geräte haben unterschiedlichste Filter an deren Aus- bzw. Eingängen. Wenn nun die Geräte zusammengeschlossen werden kann bei ungünstigen Filterverhältnissen ein Schwingkreis entstehen. Dieser Schwingkreis würde bei jedem PHIL Versuch zwangsläufig zu Instabilitäten und damit unsicheren Betriebsbedingungen führen.

Sicherzustellen dass ein Systemstatus ohne Leistungsfluss stabil und sicher ist, ist auch Notwendig um die weitere Verwendung des implementierten „Software Safety Devices“ zu ermöglichen. Das Software Safetydevice ist eine Flip Flop Schaltung die im Fehlerfall (Überstrom bzw. Überspannung) den Ausgang des Echzeitsystems 0 setzt und damit das komplette PHIL System Leistungsfrei macht. Wenn dieser Zustand nun ein Unsicherer, weil instabiler ist, ist die Verwendung nicht möglich.

3.5.2.2.1 5A Entladung

Bei diesem Versuch wird die Batterie konstant mit 5A entladen. Die nachfolgende Abbildung 34 zeigt die DC und AC Spannungen und Ströme. Der Versuch konnte stabil durchgeführt werden.

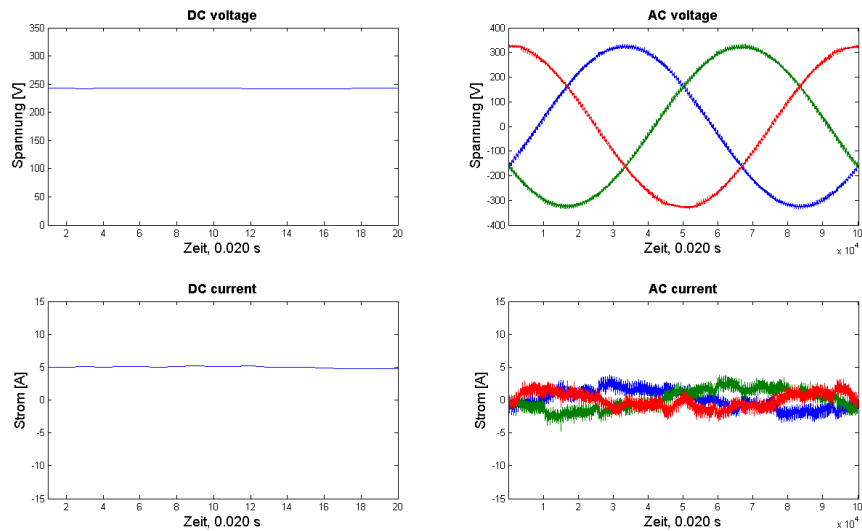


Abbildung 34: Spannungs und Stromverläufe, AC und DC Seitig bei 5A Entladestrom

3.5.2.2.2 10A Entladung

Bei diesem Versuch wird eine konstante Batterieentladung mit 10A Entladestrom simuliert. Die DC und AC Spannungen und Ströme sind in Abbildung 35 dargestellt. Auch dieser Versuch konnte stabil durchgeführt werden.

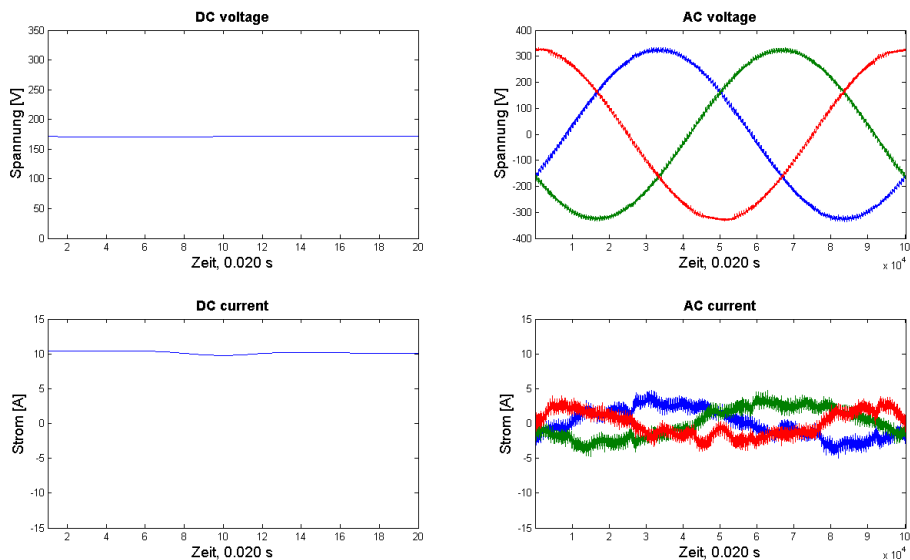


Abbildung 35: Spannungs und Stromverlauf, AC und DC Seitig bei 10A Entladestrom

3.5.2.2.3 Tiefentladung der Batterie

Dieser Versuch war der erste Versuch der Versuchsreihe der das Potential eines PHIL Versuches voll ausschöpft. Die Tiefentladung einer Batterie führt mitunter zu einer Beschädigung der Batterie. Um eine solche Beschädigung zu vermeiden wird ein solcher Versuch also nicht mit einer Realen Batterie durchgeführt.

Durch die Verwendung des Batteriesimulators in Verbindung mit dem Implementierten Batteriemodell macht eine totale Tiefentladung allerdings möglich da keine Reale Hardware beschädigt wird. Das Verhalten der Batterie entspricht, in Abhängigkeit vom Verwendeten Model dem einer realen Batterie und daher kann das Verhalten des Inverters bei einer totalen Tiefentladung der Batterie untersucht werden.

Die nachfolgende Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse des Versuches. Das Verhalten des Inverters bei diesem Versuch hat sich als sehr stabil herausgestellt. Durch das Wegfallen der DC Seitigen Batteriespannung stellt der Inverter seinen Betrieb ein ohne in einen unsicheren Betriebszustand überzugehen.

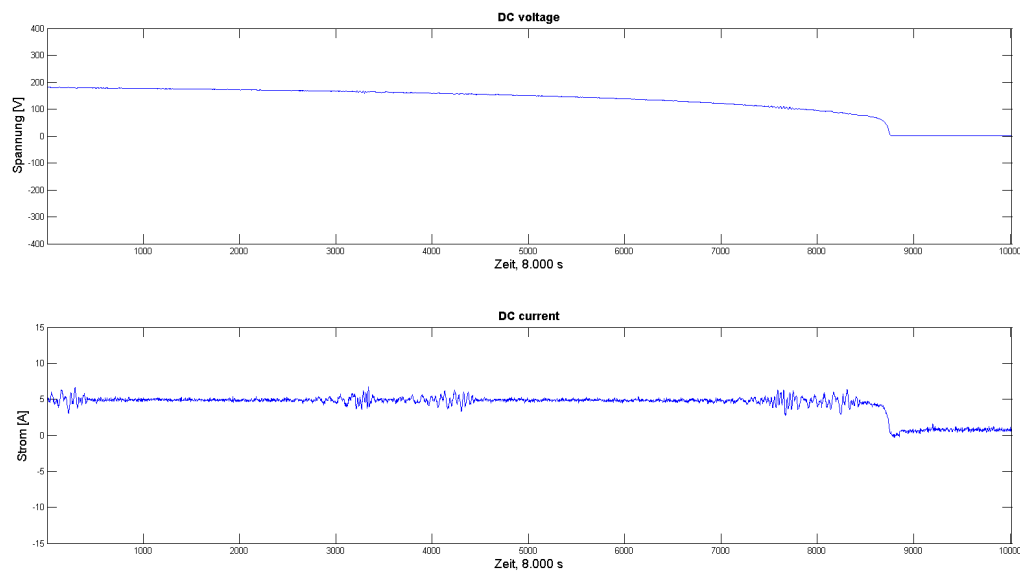


Abbildung 36: DC Spannung und Strom bei Tiefentladung der Batterie

3.5.2.2.4 Sprunghafte Änderung SoC

Bei diesem Versuch handelt es sich um einen weiteren Versuch der das Potential eines PHIL Versuches darlegt. Hier wurde der SoC der Batterie sprunghaft geändert. Eine solche sprunghafte Änderung des SoC ist mit einer Realen Batterie nicht nachbildbar. Mit einer PHIL Simulation hingegen kann ein solches Szenario problemlos nachgebildet werden.

Die nachfolgende Abbildung 37 zeigt die dabei auftretenden DC und AC Spannungen und Ströme, wobei AC Seitig nur eine Phase dargestellt ist um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten.

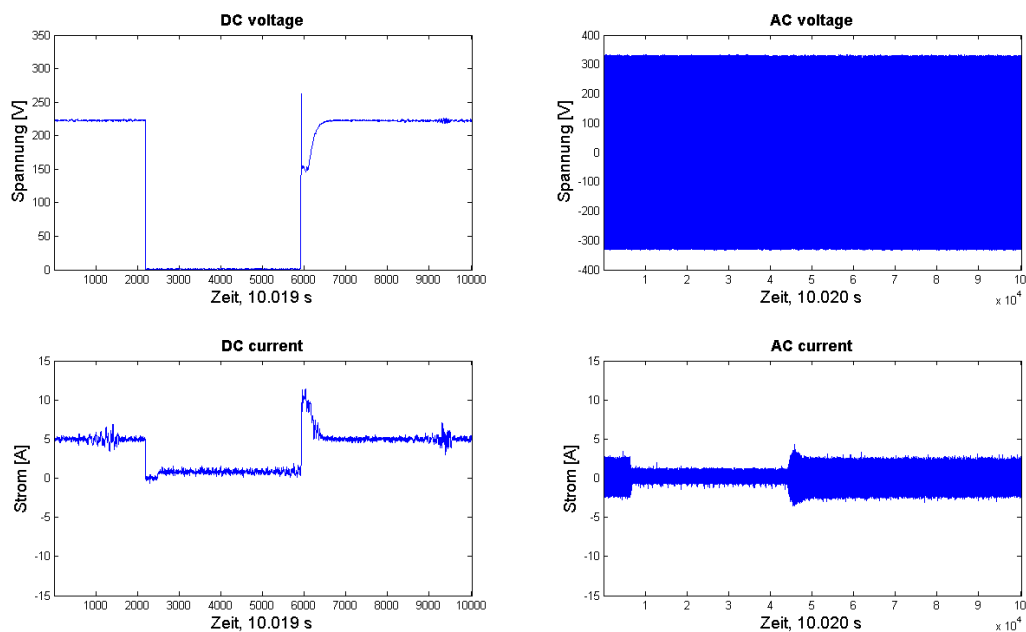


Abbildung 37: DC und AC Seitige Spannung und Strom bei Sprunghafter Änderung des SoC von 0,4 auf 0 und retour. AC Seitig wird zwecks Übersichtlichkeit nur 1 Phase dargestellt

3.5.2.2.5 Sprunghafte Änderung Entladestrom

Bei diesem Versuch wurde eine Sprunghafte Änderung des Entladestromes simuliert. In der nachfolgenden Abbildung 38 sind die daraus resultierenden Effekte sehr deutlich sichtbar. Auf der DC Seite führt die Sprunghafte Änderung des Entladestromes von 5A auf 0A zu einem entsprechenden Anstieg der Batteriespannung. Dieser Effekt wäre ohne die PHIL Implementierung eines Batteriemodellens nicht sichtbar, da die DC Spannungsquelle keine Rückführgröße besitzen würde.

AC Seitig ist ein sehr interessanter Effekt zu beobachten. Die ALM hat einen Vergleichsweise hohen Eigenverbrauch was bei ihrer gedachten Verwendung kein Problem darstellt. Für die Anwendung beim V2G-Inverter Demonstrator war die Verwendung der ALM zwar günstig aber nicht ideal. Bei diesem Versuch ist mit dem Wegfall des DC Stromes ein Anstieg des AC Stromes zu bemerken. Das ist bei einer Entladung der Batterie nicht naturgemäß. Hier passiert aber das folgende:

Aus einem Sicherheitsgedanken heraus wurden die PHIL Versuche mit geringen Leistungen durchgeführt, damit wenn ein unerwartetes Fehlverhalten eintritt die etwaigen Folgen und Beschädigungen möglichst gering ausfallen. Die ALM zieht die Leistung für den Eigenverbrauch asymmetrisch, also 1 Phasig. Das führt dazu, dass an dieser einen Phase der AC Strom steigt wenn DC Seitig keine Leistung mehr auftritt. Was aufgrund des Zeitbereiches der Darstellung in Abbildung 38 nicht zu sehen ist, ist der Phasensprung im Strom und damit die Umkehr des Leistungsflusses.

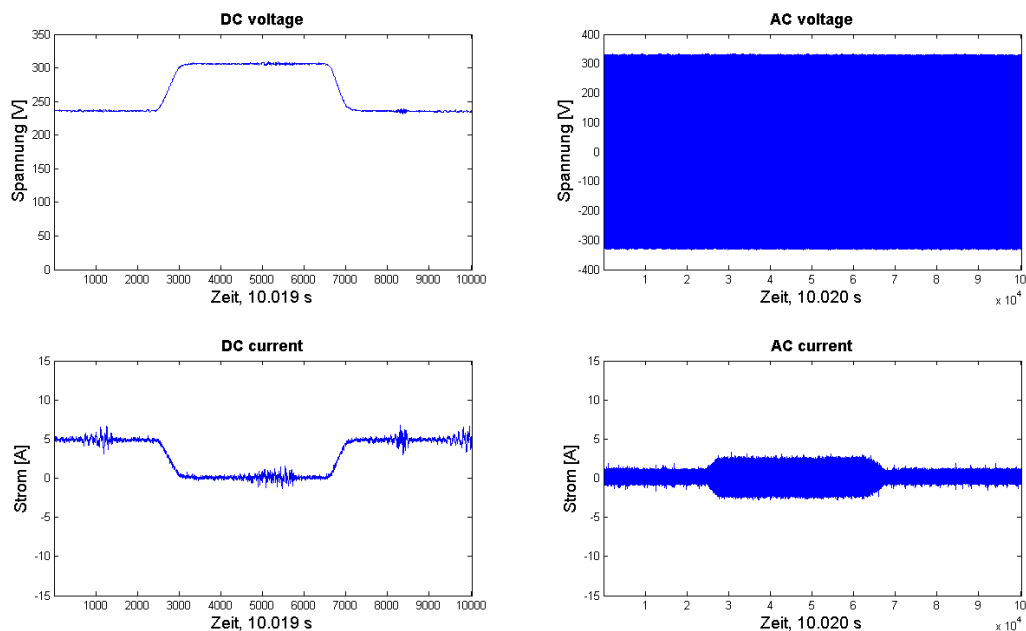


Abbildung 38: DC und AC Spannungen und Ströme bei einer Sprunghaften Änderung des Entladestromes. AC Seitig ist zwecks der Übersichtlichkeit nur 1 Phase dargestellt

In Abbildung 39 sind die AC Phasen einzeln dargestellt. Dadurch ist der eben diskutierte Effekt noch deutlicher zu sehen. In dieser Darstellung ist L3 jene Phase von der die ALM asymmetrisch den Eigenverbrauch zieht. Auch ist deutlich zu sehen das auf L3 weniger Strom ins Netz fließt, was auch auf den asymmetrischen Eigenverbrauch zurückzuführen ist.

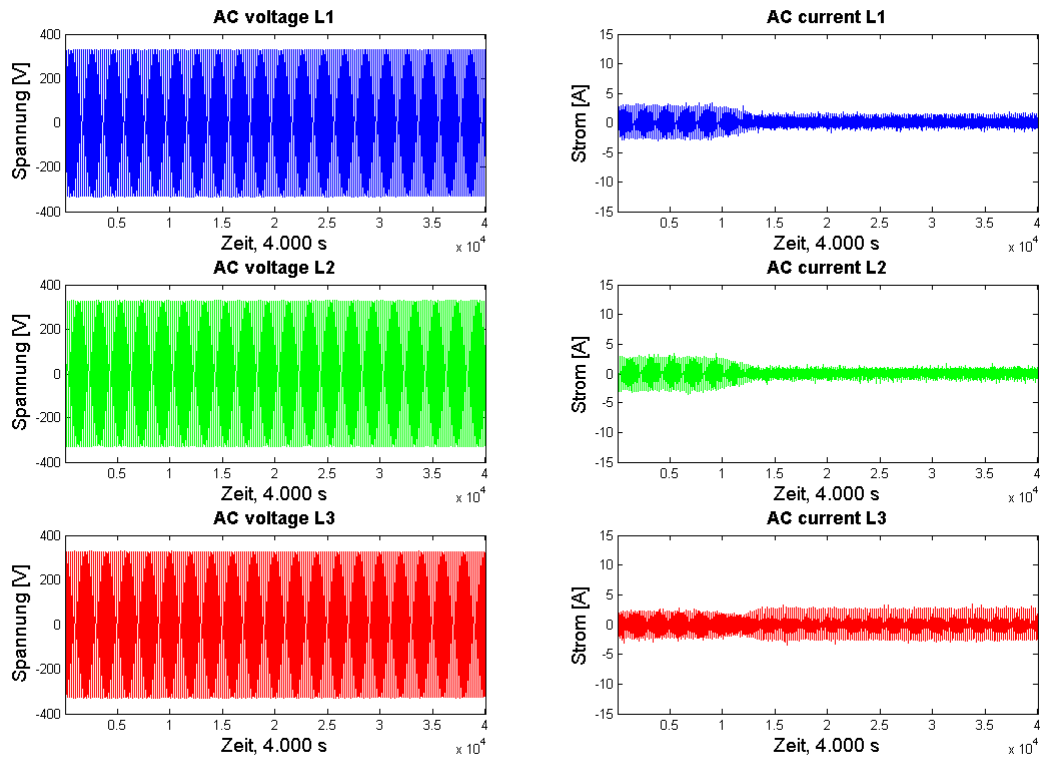


Abbildung 39: Darstellung der 3 AC Phasen

3.5.2.3 Diskussion PHIL Versuche

Im Zuge der für das V2G-Inverter Projekt durchgeführten PHIL Versuche mit den V2G-Inverter Demonstrator konnten mehrere Versuche durchgeführt werden die ohne eine Implementierung als PHIL Simulation nicht durchgeführt werden konnten. Es wurden bei den PHIL Versuchen mehrere DC-Seitige Szenarien und Fehlerfälle getestet die mit einer realen Batterie so nicht durchführbar gewesen waren, weil eine dauerhafte Beschädigung der Batterie aufgetreten wäre

PHIL als Simulationstechnologie steckt im Vergleich zu vielen anderen Methoden immer noch in ihren Kinderschuhen. Erstmalig wurde im Zuge dieses Projektes ein bidirektionaler Laderegler beidseitig von, von einem Echtzeitsystem angesteuerten, Leistungsverstärkern angesteuert. Von sehr großer Relevanz ist, dass beidseitig eine Rückkopplung stattgefunden hat, das Verhalten des V2G-Inverters hat also das Modellverhalten beeinflusst.

In der derzeitig Aufgebauten Version des Demonstrators wurde eine Siemens Standard Komponente, die ALM, für die Netzanbindung verwendet. Die Gründe dafür sind im D4.1 & D4.2 dargelegt. Die ALM weist einen relativ hohen Eigenverbrauch auf und keine besonders hohe Störungsresistenz bei Netzstörungen. Für die PHIL Versuche wurde daher im Gegensatz zu den Offline Simulationen, die im vorderen Teil dieses Deliverables dokumentiert sind, der Schwerpunkt auf die DC Seite und die damit Verbundenen Szenarien gelegt.

Um das reale Verhalten der Fahrzeugbatterie nachbilden zu können wurde ein Batteriemodell entwickelt und eingesetzt. Dieses Model wurde dann so skaliert, dass eine Batterieentladung auch bei geringen Leistungen in einer überschaubaren Zeit, von wenigen Minuten, stattfindet. Es war für den PHIL Versuch nicht zwingend erforderlich in kleinen Leistungsbereichen zu agieren, allerdings mindert diese Vorgehensweise das Gefahrenpotential des Versuches im Falle eventueller Instabilitäten.

Die Ergebnisse der Versuche sind sehr zufriedenstellend. Es konnte gezeigt werden, dass der V2G-Inverter generell ein sehr stabiles Verhalten aufweist und dadurch störungsresistent ist. Auch bei den Testszenarien, die nur durch ein Fehlverhalten der Peripherie des Inverters verursacht werden können hat der Inverter ein sehr sicheres und störungsresistentes Verhalten gezeigt.

3.5.2.4 Lessons Learned

Bei den ersten Aufbauten und Versuchen mit den V2G-Inverter PHIL Setup kam es zu einem Auslösen des Software Safety Devices. Genauere Untersuchungen des Fehlerfalles haben schnell die Ursache gezeigt.

Die Verwendete ALM zur Netzanbinung des V2G-Inverters erzeugt beim Einschalten eine Stromspitze. Diese Stromspitze war ausreichend groß um die Grenzwerte des Safety Devices trotz Eingangsfilter zu übertreffen. Eine entsprechende Nachjustierung des Safety Devices, durch ein leichtes Anheben der Grenzwerte und eine Anpassung der Eingangsfilter ermöglichte die weitere Durchführung der V2G-Inverter PHIL Tests.

3.6 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Rahmen vom Arbeitspaket 2 sind die möglichen Vermarktungsstrategien für das V2G-Konzept ermittelt worden. Diese Strategien werden unterteilt in:

- 1) Teilnahme der E-Fahrzeuge an den Regelenergiemärkten und
- 2) Abdeckung der Verbrauchspitzen der Haushalte in den Abendstunden.

Im Rahmen des Projekts V2G-Strategien (gefördert im Rahmen der 3. Ausschreibung der Programmlinie Neue Energien 2020, Projektnummer:825417) wurde die Teilnahme der E-Fahrzeuge an Regelenergiemärkten mit Berücksichtigung der Gegebenheiten der Märkte im Detail untersucht. Daher liegt hier der Fokus der Analyse des V2G-Konzepts auf die zweite beschriebene Variante.

Abbildung 40 zeigt die Grundidee für die Analyse des zweiten Konzepts. Die Abbildung stellt in der ersten Linie ein Niederspannungsnetz (NS-Netz) dar, dass mit einer hohen Penetration der PV-Anlagen konfrontiert ist. Dieser Umstand führt zur Absenkung des Summenlastprofils des Transformators (rote Linie) zu den Zeiten mit hoher Einstrahlung. Weiters kommen auch sonstige Extremwerte in den Nacht- und Abendstunden aufgrund des Verbrauchsverhaltens der angeschlossenen Anlagen zustande.

Die Interaktion zwischen der erneuerbaren Erzeugung und E-Fahrzeuge kann mit erzeugungs- und verbrauchsorientiertem Laden bzw. Entladen hergestellt werden. Das Erzeugungsorientierte Laden aus der PV-Erzeugung erfolgt in Abhängigkeit des Standortes der PV-Anlage (am Wohnort oder Arbeitsplatz) und der Verfügbarkeit der E-Fahrzeuge. Dabei kann auch bei Bedarf das Laden der E-Fahrzeuge während der Nachtstunden erfolgen, wenn unzureichende PV-Erzeugung für den Folgetag prognostiziert wird. Das Entladen (zusätzlich zur Erfüllung der Mobilitätsbedürfnisse) der E-Fahrzeuge ist als verbrauchsorientiertes Entladen definiert, wobei das Entladen in den Abendstunden zu den Zeiten mit hohem Haushaltseigenverbrauch stattfindet (siehe Abbildung 40 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Im Zusammenhang mit der vorgestellten Ausgangssituation in Kombination mit einem hohen Durchdringungsgrad der E-Fahrzeuge (angeschlossen an NS-Netze) werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- 1) Kann mit der Definition gesteuerten Lade- /Entladestrategien das Auftreten von Extremwerten des Summenlastprofils des NS-Netzes vermieden werden? Kann damit die Trafostation kleiner dimensioniert und in weiterer Folge Investitionskosten eingespart werden?
- 2) Welche Erlöse könnten mittels Energierückspeisung aus den Batterien für die Fahrzeugnutzer erwartet werden?

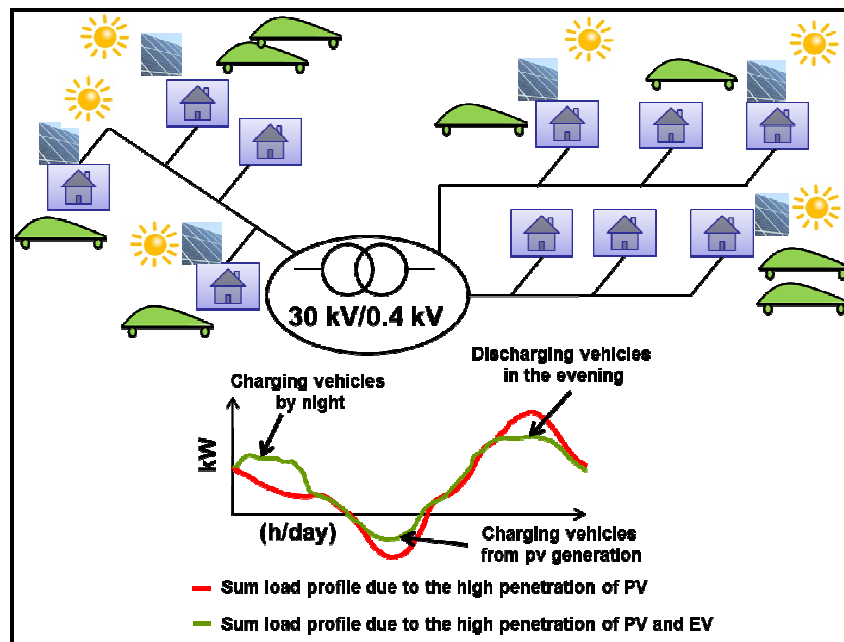


Abbildung 40: Auswirkung des hohen Durchdringungsgrades der PV-Anlagen und E-Fahrzeuge auf Summenlastprofil eines Niederspannungsnetzes

Zusammenfassend, können die analysierten Laden- und Entladestrategien wie folgt unterteilt werden:

- Laden eines E-Fahrzeugs am Wohnort von einer installierten PV-Anlage - Verfügbarkeit der Fahrzeuge muss gegeben sein (erzeugungsorientiertes Laden). Das Laden des E-Fahrzeugs kann auch bei Bedarf in den Nachtstunden (von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr) erfolgen (verbrauchsorientiertes Laden).
- Entladen der E-Fahrzeuge von 19:00 Uhr bis 21:00 Uhr mit einer konstanten Entladeleistung in der Höhe von 1 kW_{el} : Abbildung 41 stellt ein ländliches NS-Netz mit Anzahl der Wohneinheiten je Anschlusspunkt dar. Jeder Anschlusspunkt ist ausgehend von der Anzahl der Einwohner mit einem passenden gemessenen Lastprofil hinterlegt worden. Die Summe der zuordneten gemessenen Lastprofilen innerhalb des NS-Netzes ist mit dem Summenlastprofil in Abbildung 42 wiedergegeben. Es ist ersichtlich, dass das Summenlastprofil nach der Mittagzeit im Zeitraum von 19:00 Uhr bis 21:00 die höchsten Verbrauchswerte aufweist. Daher findet das Entladen der E-Fahrzeuge am Wohnort in dem erwähnten Zeitraum statt (verbrauchsorientiertes Entladen).

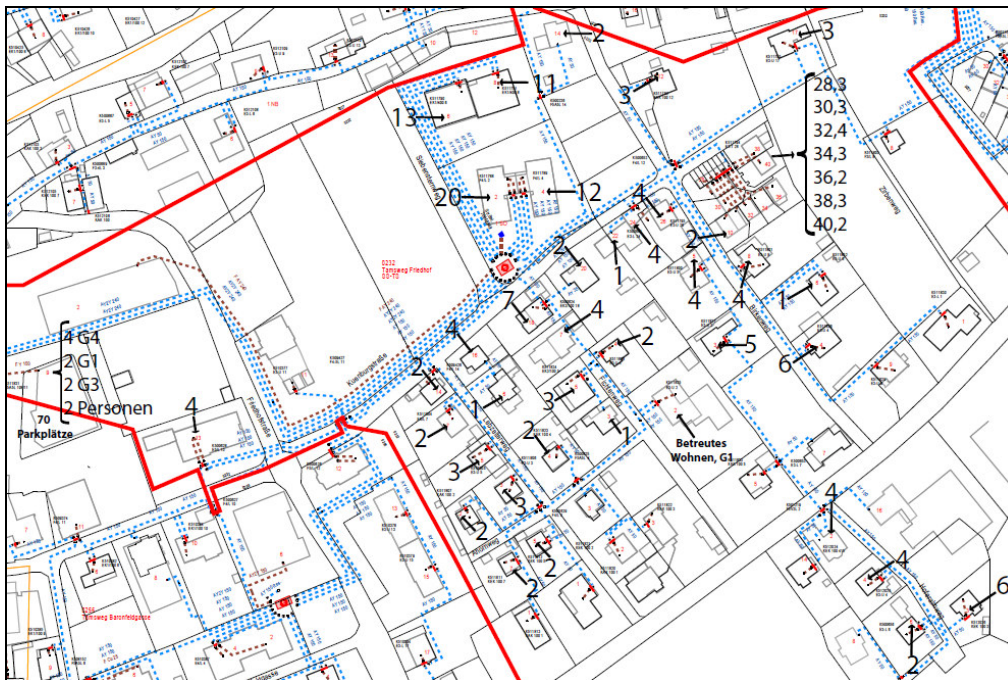


Abbildung 41: Ein ländliches Niederspannungsnetz mit Abschätzung der Anzahl der Wohneinheiten je Anschlusspunkt (vgl. Projekt V2G-Strategies)

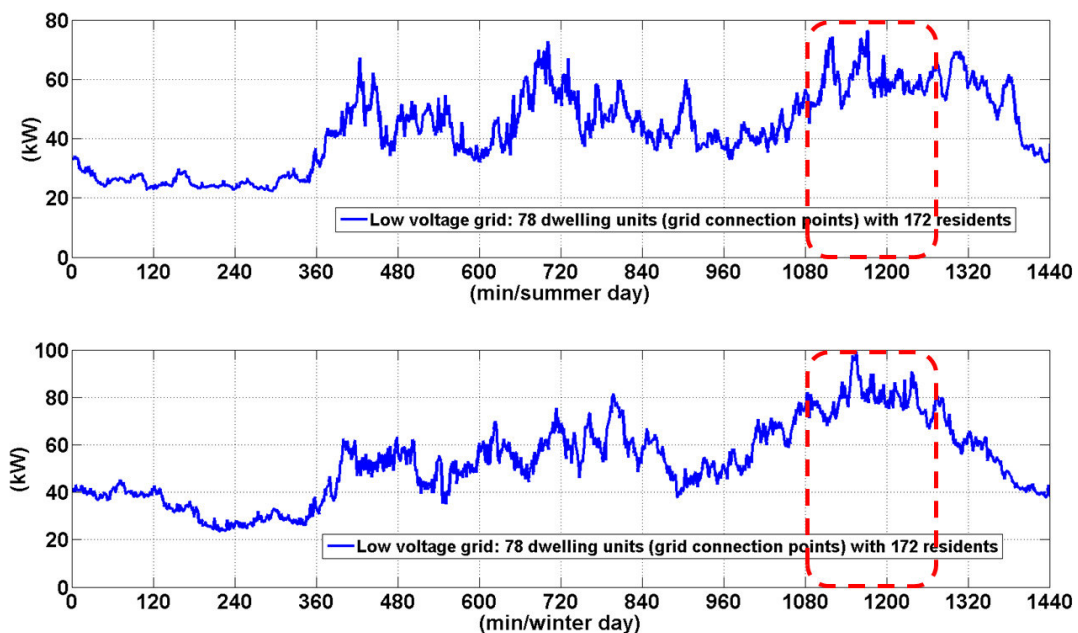


Abbildung 42: Summenlastprofil des dargestellten NS-Netzes (siehe Abbildung 2)

Die erwähnten erzeugungs- und verbraucherorientierten Laden/Entladekonzepte sind im Detail wie folgt implementiert: Der Ladestand der Batterien vor dem Beginn der ersten Tagesfahrt liegt beim zweifachen des Tagesenergiebedarf für die Mobilitätsaktivitäten der untersuchten Fahrzeugprofilen. Die notwendige Energiemenge wird mittels Laden der Fahrzeuge von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr oder aus der PV-Erzeugung - falls vor der ersten Tagesfahrt vorhanden - abgedeckt. Diese Vorgangsweise garantiert die Erfüllung der Mobilitätsbedürfnisse der Fahrzeugnutzer unabhängig von der PV-Erzeugung und Witterungsbedingungen. Der restliche Batterieinhalt (maximale Batteriekapazität minus Batteriestand vor

der ersten Tagesfahrt) wird mit der Energie aus der PV-Anlage abgedeckt. Das Ziel des Ladens aus der PV-Erzeugung liegt hier in der ersten Linie in Reduktion der PV-Spitzenproduktion.

Abbildung 43 beschreibt die Realisierung der erwähnte Lade- und Entladestrategien. Das obere Bild bezieht sich auf die Darstellung des Batteriestands eines E-Fahrzeugs (Bruttokapazität = 24 kWh) wobei das Gesamtkonzept detailliert im unteren Bild wiedergegeben worden ist. Die Verfügbarkeit des Fahrzeugs am Standort "Wohnort" (rote Linie) definiert die Möglichkeit zum Laden bzw. Entladen des Fahrzeuges während der PV-Erzeugung bzw. in den vordefinierten Entladezeitpunkten (standortabhängiges Laden/Entladen).

Im Zusammenhang mit dem standortabhängigem Laden der E-Fahrzeuge aus der PV-Erzeugung sind in Anlehnung an [Leitinger, 2011] folgende Identifikationsfaktoren erhoben worden:

- Deckungsgrad der Batterie: Verhältnis von geladener Energie aus der PV-Erzeugung zur Batteriekapazität
- Integrationsgrad der PV-Anlage: Verhältnis von geladener Energie aus der PV-Erzeugung zur gesamten PV-Erzeugung

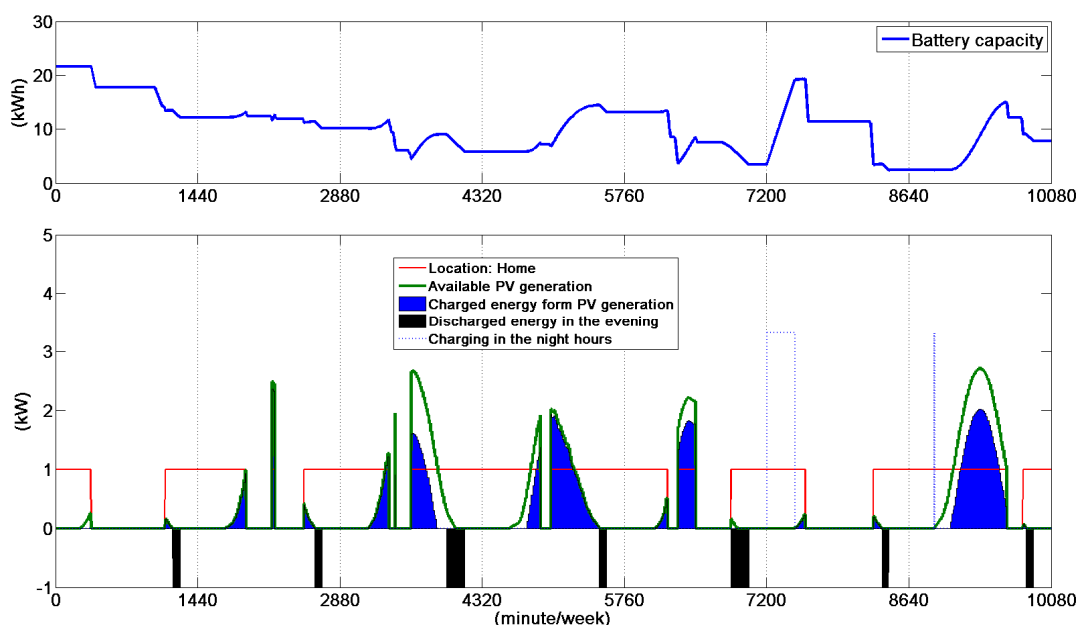


Abbildung 43: Ladestand der Batterie (maximale Kapazität 24 kWh) eines E-Fahrzeugs basierend auf beschriebenen erzeugungs- und verbrauchsorientierten Lade-/Entladestrategien

Für die Beantwortung der gestellten Fragen sind die folgenden Daten verwendet worden:

- Wöchentliche Summenlastprofile von sechs reale NS-Netze mit Informationen im Zusammenhang mit der Anzahl der Haushalte und deren jährlichen Energieverbrauchswerte (ausgewählte Netze aus dem Projekt V2G-Strategies)
- PV-Erzeugungsprofil: Die Abdeckung des Haushaltsverbrauch mittels des Entladens der E-Fahrzeuge basiert auf gemessenen Haushaltsprofile für eine Winter- bzw. Sommerwoche. Die wirtschaftliche Analyse der Entladestrategie ergibt sich aus der Annahme, dass die geladene Energie aus der PV-Anlage für das Entladekonzept zur Verfügung stehe (Keine Ladekosten für

die entladene Energiemenge in den Abendstunden). Daher wird für die wirtschaftliche Erhebung des Entladekonzepts von unterschiedlichen PV-Erzeugungsprofile innerhalb einer Winter- bzw. Sommerwochen ausgegangen. Das verwendete PV-Erzeugungsprofil ergibt sich aus dem Mittelwert der Globalstrahlungswerte [Soda-is, 2011] der vorhandenen politischen Bezirken in Österreich (PV-Dachinstallation, Südausrichtung, Neigungswinkel 30 °C).

Die wöchentliche Simulation betrachtet für jedes Fahrzeugprofil eine PV-Anlage. Die Dimensionierung der PV-Anlagen orientiert sich nach dem mittleren Energiebedarf der betrachteten Fahrzeugprofile pro Jahr. Damit liegt die installierte PV-Leistung je E-Fahrzeug bei 2,7 kWp. Die repräsentativen wöchentlichen PV-Profile resultieren aus dem jährlichen Profil und beziehen sich auf die unterschiedlichen Witterungsbedingungen.

- Ladeverhalten der Li-Ion Batterien: Das Ladeverhalten der Li-Ionen Batterien (IUa-Ladung) besteht aus zwei Phasen. Das Laden der Batterie erfolgt mit konstantem Strom bzw. konstanter Spannung während der ersten bzw. zweiten Phase. In der ersten Phase (Stromphase) wird eine konstante Ladeleistung angenommen, da die Änderungen der Zellspannung sehr gering sind. Der Übergang zwischen den zwei Phasen wird mit dem sogenannten Ladeumschaltunkt, s in % des SOC (state of charge), bestimmt. Danach erfolgt die Spannungsphase, die mit einem exponentiellen Ladeverhalten beschrieben wird. Die Grenze zwischen den zwei Phasen ist mit 80 % des SOC angenommen worden.
- Degradation der Li-Ionen Batterien: Die Beeinflussung der Lebensdauer der Li-Ion-Batterien aufgrund von zusätzlichen Rückspeisung der Energie ins Stromnetz wird in der wirtschaftlichen Berechnung von V2G-Konzept berücksichtigt. [Peterson,2009] untersuchte den Einfluss von kombinierten Fahrten und V2G-Anwendungen auf Kapazitätsverluste der LiFePO₄- Batterien. Die Entladeleistungen fürs Fahren wurden als dynamische Entladungen (Variation der Entladeleistung) und für V2G-Anwendungen als konstante Entladungen definiert. Die Ergebnisse zeigen in erster Linie eine geringere Beeinflussung der Kapazitätsverluste durch Tiefentladungen im Vergleich zu einer älteren Generation der Li-Batterien. Die Resultate zeigen zudem, dass die prozentuelle Kapazitätsverluste per normierter Wh bei $-6.0 \times 10^{-3} \%$ bzw. $-2.7 \times 10^{-3} \%$ für das Fahren bzw. die V2G-Anwendungen (konstante Entladeleistung) liegen.
- Fahrprofile und Standortverteilung der implementierten E-Fahrzeuge: Die technischen und wirtschaftlichen Analysen basieren auf drei unterschiedlichen Fahrzeugkategorien: Elektrofahrzeuge mit 16, 24 bzw. 48 kWh Batteriekapazitäten. Die Untersuchungen beziehen sich auf eine Fahrzeugflotte mit 94, 36 und 28 Fahrzeuge mit den erwähnten Batteriegrößen. Die Ermittlung des Fahrverhaltens der Fahrzeuge ergibt sich aus den österreichischen Mobilitätserhebungen, der Anpassung und Kalibrierung der Daten an die E-Fahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten (vgl. [Litzlbauer, 2010]).

3.6.1 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wie aus der Abbildung 40 ersichtlich, ist das erzeugungsorientierte Laden der E-Fahrzeuge von der PV-Anlagen mit einem verbrauchsorientierten Laden von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr kombiniert worden. Im

Zusammenhang mit der Beschreibung der Interaktion zwischen E-Fahrzeuge und PV-Erzeugung sind zwei Faktoren, Deckungsgrad der Batterien und Integrationsgrad der PV-Anlagen, definiert worden. Der wöchentliche Deckungsgrad der Batteriekapazität liegt zwischen 5 % und 43 % und hängt sehr stark von dem Fahrverhalten der E-Fahrzeuge ab. [Leitinger, 2011] beschreibt einen mittleren Deckungsgrad von rund 60 % für einen Beobachtungszeitraum von einem halben Jahr, wobei die E-Fahrzeuge am Wohnort als auch am Arbeitsplatz aus der PV-Erzeugung geladen werden. Der Integrationsgrad der PV-Anlagen zeigt ein umgekehrtes Bild im Vergleich zum Deckungsgrad. Je besser die PV-Erzeugung desto geringer fällt der wöchentlichen Integrationsgrad der PV-Anlagen aus (siehe Abbildung 44).

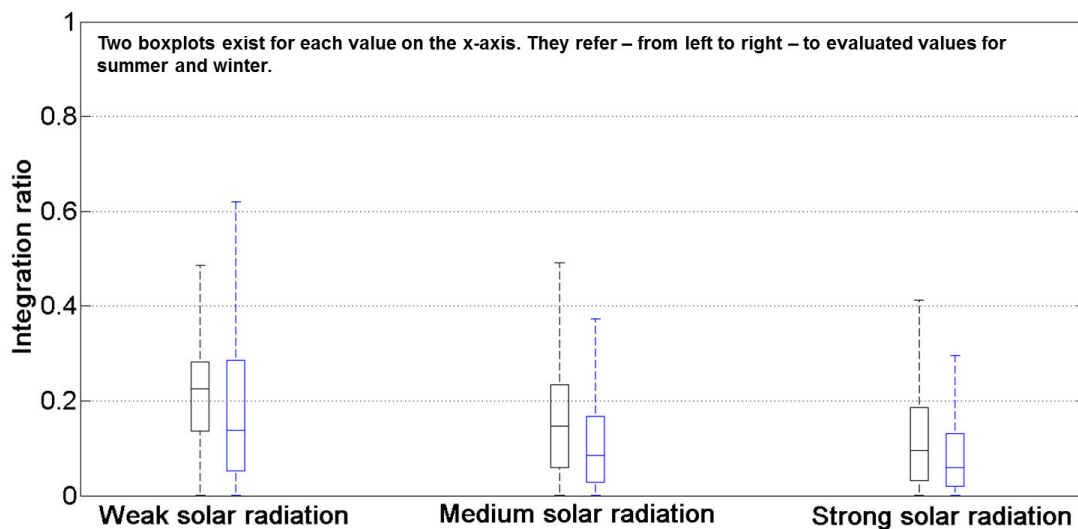


Abbildung 44: Wöchentlicher Integrationsgrad der PV-Anlagen

Die wirtschaftliche Bewertung der erwähnten erzeugungs- und verbrauchsgesteuerten Laden- und Entladekonzepte der E-Fahrzeuge ist in zwei Teilaspekten unterteilt worden:

- 1) Kann mit der definierten Lade- und Entladestrategien die Dimensionierung der Trafostationen der Niederspannungsnetze bei hoher Durchdringung der PV-Anlagen und E-Fahrzeuge verkleinert und damit die Investitionskosten vermindert werden?
- 2) Welche Erlöse könnten mittels Energierückspeisung (Entladestrategie zwischen 19:00 Uhr und 21:00 Uhr) aus den Batterien für die Fahrzeugnutzer erwartet werden?

Die Analyse des Einflusses der erwähnten erzeugungs- und verbrauchsgesteuerten Lade- und Entladekonzepte der E-Fahrzeuge auf die Dimensionierung der Trafostationen der NS-Netze bezieht sich auf die ausgewählten Niederspannungsnetze (insgesamt sechs) aus dem Projekt V2G-Strategien (FFG Projektnummer: 825417). Diese Netze sind mit einer hohen Anzahl an PV-Anlagen (Installierte Leistung je PV-Anlage liegt bei 2,7 kWp) und gleicher Anzahl an E-Fahrzeuge (Durchdringungsgrad 40%, zwischen 16 bis 65 E-Fahrzeuge je Netzabschnitt) erweitert worden. Die Analyse des Einflusses der erwähnten Lade- und Entladekonzepte der E-Fahrzeuge auf die Dimensionierung der Trafostationen (minimale und maximale Werte der Summenlastprofil) bezieht sich auf die folgenden Situationen:

- Eine Winterwoche mit niedriger solaren Strahlung
- Eine Sommerwoche mit guter solaren Strahlung

Nach der Auswertung des Einflusses der E-Fahrzeuge auf Niederspannungsnetze mit hoher PV-Installationsrate sind die folgenden Ergebnisse erzielt worden:

- Aus Sicht einer Trafostation können die niedrigsten Werte des Summenlastprofils - welche aufgrund der PV-Erzeugung zustande kommen - mit Laden der E-Fahrzeuge zu Zeiten der PV-Erzeugung reduziert werden.
- In den Winterzeiten mit niedriger PV-Erzeugung kann mit Verschiebung der Ladezeiten der E-Fahrzeuge in den Schwachlastzeiten (von 00:00 Uhr bis 06:00 Uhr) und Vermeidung des gleichzeitigen Ladens der E-Fahrzeuge (Verringerung des Gleichzeitigkeitsfaktors) keine Erhöhung der maximalen Werte des Summenlastprofils trotz hoher Durchdringung der E-Fahrzeuge beobachtet werden.
- Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass die Dimensionierung der Trafostationen der NS-Netze, die mit hoher Installationsrate von PV-Anlagen konfrontiert sind, nicht mit Integration von E-Fahrzeuge verringert werden kann. Dabei kann mit den erwähnten erzeugungs- und verbrauchsorientierten Laden/Entladekonzepten, einen hohen Integrationsgrad von E-Fahrzeuge bis zu 40 % in den NE-Netze ohne Leistungssteigerung der vorhandenen Trafostationen erzielt werden.

Die wirtschaftliche Bewertung des Entladekonzepts (Entladen der Batterien zwischen 19:00 Uhr und 21:00 Uhr zur Abdeckung des Haushaltsbedarfs) bezieht sich auf die Ermittlung der möglichen Deckungsbeiträge für E-Fahrzeuge mit diversen Fahrprofilen. Die Berechnung der Deckungsbeiträge wird in Abhängigkeit von der Investitionskosten der Batterie angegeben, wobei die Ladekosten der entladenen Energiemengen (Ladeenergie aus der installierten PV-Anlage) bei null liegen. Die Deckungsbeiträge für das Entladekonzept ergeben sich aus der Addition der Einnahmen durch die Abdeckung des Haushaltbedarfs, Einspeisung der Überschussigen Energie ins Verteilnetz und Batteriedegradationskosten.

Abbildung 45 stellt die möglichen Deckungsbeiträge des Entladekonzepts für unterschiedlichen Batterieinvestitionskosten und einen mittleren Haushaltstrompreis von 19,56 €/kWh (40 % Energiepreis, 60 % Netzgebühren und Steuern) dar. Die Deckungsbeiträge liegen ab Batterieinvestitionskosten von 500 €/kWh unabhängig von ausgewähltem Fahrprofil, Verfügbarkeit am Wohnort und solarer Strahlung in einem positiven Bereich. Der Medianwert der Deckungsbeiträge liegt bei rund 50 € per Fahrzeug und Jahr (Batterieinvestitionskosten = 500 €/kWh).

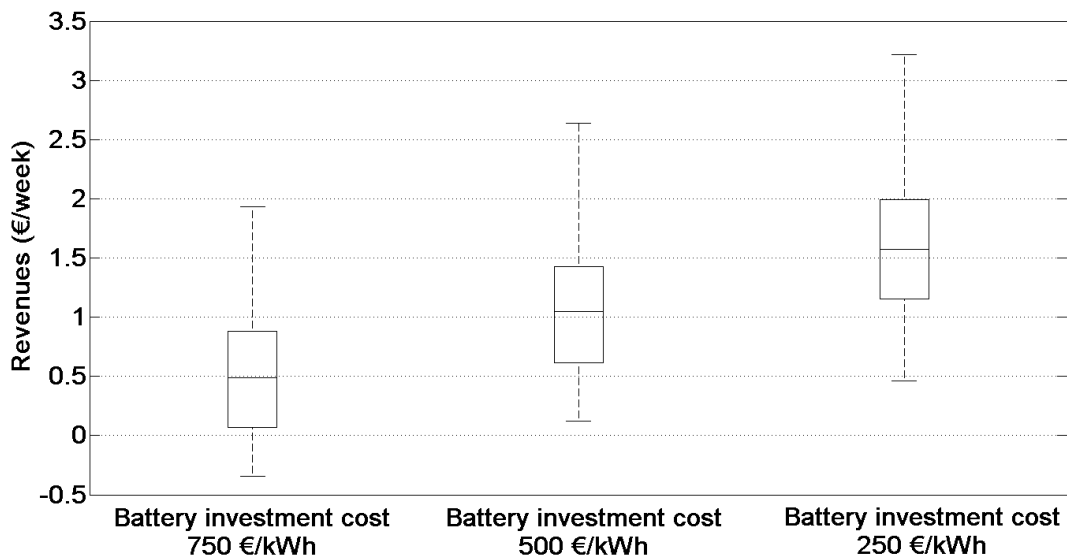


Abbildung 45: Deckungsbeiträge des Entladevorgangs der E-Fahrzeuge von 19:00 Uhr bis 21:00 Uhr für unterschiedlichen Batterieinvestitionskosten

Abbildung 46 stellt die Medianwerte der möglichen Deckungsbeiträge des Entladekonzepts für unterschiedliche Batterieinvestitionskosten mit der Variation des Energiepreises (Basisjahr 2011) dar. Die Erhöhung des Energiepreises um 50 % führt zur Vergrößerung der Deckungsbeiträge um rund 39 % (Batterieinvestitionskosten = 500 €/kWh).

Zusammenfassend kann eine wirtschaftliche Realisierung des Entladens der E-Fahrzeuge zum Abdecken des Haushaltsverbrauchs als schwierig eingeschätzt werden. Einerseits kann einen geringen Deckungsbeitrag erzielt werden, wobei andererseits zum Entladen der Batterie zusätzliche Investitionskosten für V2G-Inverter benötigt werden.

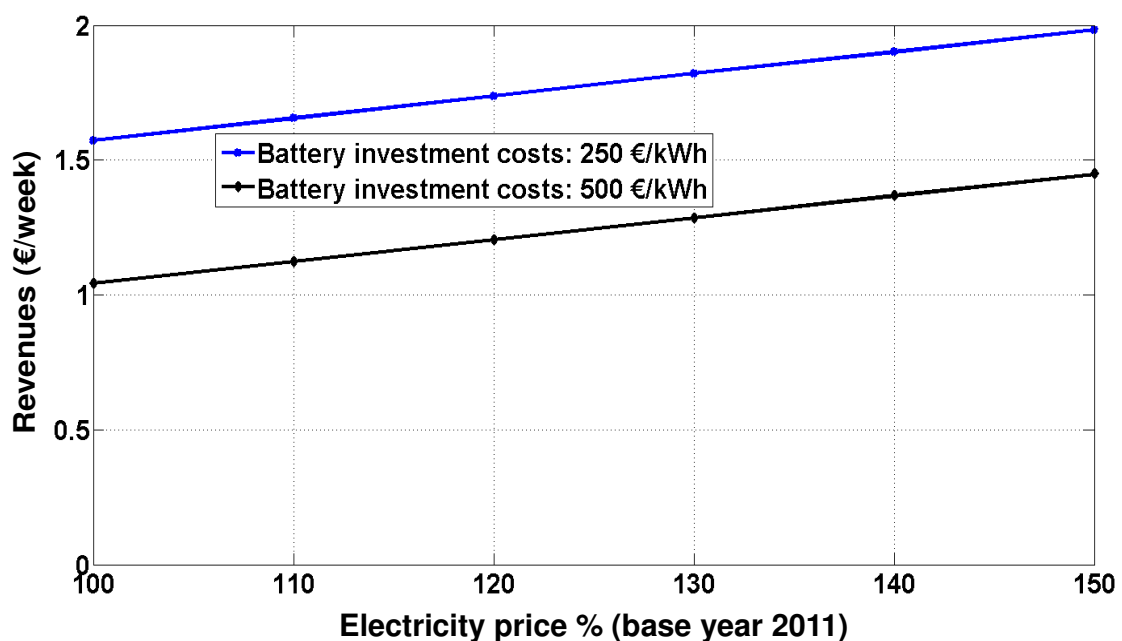


Abbildung 46: Deckungsbeiträge des Entladevorgangs mit der Variation der Batterieinvestitionskosten und mittlerem Energiepreis

Neue Energien 2020 - 4. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen beziehen sich zum einen auf die möglichen Schaltungstopologien, und darüber hinaus auf den Einsatz der neuen Halbleitertechnologie „Silizium Karbid“. Der Aufbau des V2G-Demonstrators hat gezeigt, dass die Anforderungen an eine bidirektionalen Ladeeinheit mit entsprechender Leistung mit relativ geringem Aufwand realisierbar ist. Für die Realisierung der dazu erforderlichen Funktionsblöcke „Potentialtrennstufe und Leistungsstufe“ bieten sich grundsätzlich verschiedenste Schaltungstopologien an, welche jedoch für das jeweilige Einsatzgebiet aus technischen, wie auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kritisch evaluiert werden müssen.

Der Einsatz von Silizium Karbid Bauteilen hat gezeigt, dass eine Reduktionen der Bauformen, sowie dadurch resultierend eine entsprechende Steigerung der Leistungsdichte möglich ist.

Einen sehr wissenschaftlichen Charakter hatten die PHIL Versuche die am Projektende mithilfe des V2G-Inverter Demonstrators durchgeführt wurden. Die Erstellung der verwendeten Versuchsarchitektur, die bis zu diesem Zeitpunkt in dieser Komposition einen sehr hohen Neuheitsgrad aufweist ermöglicht die Untersuchung des transienten Verhaltens eines bidirektionalen Ladereglers sowohl AC als auch DC Seitig.

In allen untersuchten Anwendungsfällen (wirtschaftliche Bewertung) kann die Energierückspeisung aus den Batterien (LiFePO₄- Batterien) aufgrund des niedrigen Niveaus der Erlöse derzeit als nicht realisierbar eingestuft werden. Die Gründe liegen in den hohen Kapazitätsverlusten und den daraus resultierenden Degradationskosten der Batterien. Damit ist es unwahrscheinlich, dass die berechneten Erlöse die Kosten für V2G-Inverter, Kommunikationsinfrastruktur und Entladesteuerung übersteigen. Daher ist eine Einbindung der Elektrofahrzeuge ins Energiesystem lediglich durch gezielte Ladestrategien als effizient zu erachten.

5 Ausblick und Empfehlungen

Das V2G-Inverter Projekt hat mehrere Topologien untersucht die eine technische Realisierung eines bidirektionalen Ladereglers für Elektrofahrzeuge ermöglichen. Unter dem Fokus der Verwendung neuartiger Halbleiter Bauelemente aus Silizium Karbid wurde eine Topologie für einen Demonstratoraufbau im Laborumfeld gewählt. Begleitend zu diesen Maßnahmen wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt.

Im Projektbetrieb hat sich klar gezeigt, dass die zukünftige Kernaufgabe der Elektromobilität, und der Schaffung der mit ihr verbundenen Netzservices, nicht nur der Laderegler ist sondern der elektrische Speicher im Elektrofahrzeug. Unter der Verwendung der derzeit zur Verfügung stehenden Speichertechnologien sind die gesamten Kosten aufgrund der Degradationsverluste im Speicher für die möglichen Zielanwendungen eines bidirektionalen Ladereglers nicht wirtschaftlich abbildbar.

Eine klare Empfehlung des Projektkonsortiums ist es daher neben der potentiellen weiteren Forschung im Bereich bidirektionaler Laderegler auch die zukünftigen Speichermöglichkeiten für Elektrofahrzeuge zu untersuchen.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

- [APCS, 2009]: APCS (Power clearing and settlement AG): "Anhang Ausgleichsenergiebewirtschaftung zu den AB-BKO", Version 12:00, 2009
- [APCS, 2011]: „Statistiken zu Auktionierungen (UCTE, Sekundärregelenergie, Ausgleichsenergie etc.), sowie andere für die Regelzone APG relevante Daten“ Information der APCS Homepage, URL: http://www.apcs.at/balance_energy_market/statistics/index.html (Datum: April 2011)
- [BEUTH, 1997] K. Beuth, W. Schmusch: „*Grundschaltungen Elektronik*“, 13. Auflage 1997, Vogel Buchverlag Würzburg
- [BROWN, 2010]: Stephen Brown, David Pyke, Paul Steenhof: "Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market", Paper in Energy Policy, doi:10.1016/j.enpol.2010.02.059, in press
- [CHAdEMO, 2011] CHAdEMO Association. <http://www.chademo.com> (Zugriff am 21.07.2012)
- [E-CONNECTED, 2010] K. Beuth, W. Schmusch: „*e-connected - Abschlussbericht 2012*“, Klima und Energiefonds, Wien, Dezember 2010
- [EINH] M. Einhorn, V. Conte, C. Kral, and J. Fleig, "Comparison of electrical battery models using a numerically optimized parameterization method," in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011, pp. 1–7.
- [EN61851-1, 2002] EN61851-Teil 1 – Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge / Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe: 2002-01-01
- [ENBW, 2011]: „Ergebnisse der Ausschreibung der Sekundärregelleistung“, Information der Homepage des Regelzonenführers EnBW, URL: <http://www.enbw-transportnetze.de/strommarkt/regelenergie/abruf-regelenergie/?app=regelenergie&activeTab=csv&auswahl=month&selectMonat=0&view=1> (Datum: April 2011)
- [ENTSOE, 2009]: Operation Handbook, P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance, Version: v3.0 rev 15/01.04.2009, Information der Homepage [https://www.entsoe.eu/nc/resources/publications/entso-e/operation-handbook/?sword_list\[\]=control](https://www.entsoe.eu/nc/resources/publications/entso-e/operation-handbook/?sword_list[]=control)
- [GAUSCH, 2009] F. Gausch: „*Zeitdiskrete approximative Linearisierung eines Cúk Konverters*“ URL: <http://www.srt.upb.de/fileadmin/Lehre/Skripte/Projektarbeiten/Cuk-Konverter.pdf> (Datum 25.12.2011, 12:15)
- [GEKE] M. W. Gekeler: Soft switching three level inverter with passive snubber circuit (S3L inverter). In: Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). 2011, ISBN 9789075815153, S. 1–10
- [HAGMANN, 1998] G. Hagmann: „*Leistungselektronik – Systematische Darstellung und Anwendung in der elektrischen Antriebstechnik*“, 2. Auflage 1998, AULA-Verlag GmbH Wiesbaden
- [HARTMANN, 2010]: N.Hartmann, E.D. Özdemir: Impact of different utilization scenarios of electric vehicles on the German grid in 2030, University of Stuttgart, Institute of Energy Economics and Rational Use of Energy, Paper in journal of Power Sources, doi:10.1016/j.jpowsour.2010.09.117
- [IEC 62196, 2010] Internationale Norm für Steckertypen und Lademodi für Elektrofahrzeuge, Ausgabe 05.2012
- [IPES, 2000] W. Kolar: „*Dreiphasiger Vienna Rectifier*“ URL: http://www.ipes.ethz.ch/ipes/Java2/Prototypen/cir_VR1.html (Datum 29.12.2011, 12:00)
- [IPES, 2004] iPES-ECPE: „*Durchflusswandler in Vollbrückenschaltung*“, URL: http://www.pes.ee.ethz.ch/fileadmin/user_upload/pes/education/fple/IE8_Full_Bridge_Script.pdf

(Datum 29.12.2011, 14:50)

[JONG] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, "Which battery model to use?," IET Software, vol. 3, no. 6, pp. 445 – 457, Dec. 2009.

[KARNER, 2011]: Andreas Karner, David Schabauer, Florian Rabacher, Sabrina Wittmoser, Friedrich Kupzog, Stefan Vielguth, Georg Hauger, Michael Klammer, Michael Ernst, Alla Alkhatib, Manfred Strubegger: "Vehicle Grid – Integration of low emission vehicles into the electric distribution grid", Auftraggeber: österreichische Klima- und Energiefonds, gefördert im Rahmen der Programmlinie Neue Energien 2020, Endbericht, 2011

[KEM, 2011] Konferenz Elektromobilität in Modellregionen – Ergebnisse und Ausblick „*Modellregion Elektromobilität München - Drive eCharged*“, Berlin, November 2011, Werner vom Eyser Siemens AG

[KEMPTON, 1999]: Willett Kempton, Toru Kubo: "Electric-drive vehicles for peak power in Japan", Paper in Energy Policy, PII: S0301-4215(99)00078-6, in press, 1999

[KEMPTON, 2004]: Willett Kempton, Jasna Tomić: "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to support large-scale renewable energy", Journal of Power Sources, doi:10.1016/j.jpowsour.2004.12.022, in press, 2004

[KONS] 3-Stufen-Pulswechselrichter mit Entlastungsnetzwerk. Deutsche Patentschrift DE 10 2010 008 426 B4; Anmeldetag: 18. Februar 2010; Offenlegungstag: 18. August 2011; Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 1. September 2011; Patentinhaber: Hochschule Konstanz, 78462, Konstanz, DE; Erfinder: Gekeler, Manfred W., 78464, Konstanz, DE

[KULARATNA, 1998] N. Kularatna: „*Power Electronics Design Handbook: Low-Power Components and Applications*“, 1998, Newnes Verlag

[LAU] Lauss, G.; Lehfuss, F.; Viehweider, A.; Strasser, T.; , "Power hardware in the loop simulation with feedback current filtering for electric systems," IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.3725-3730, 7-10 Nov. 2011
doi: 10.1109/IECON.2011.6119915.

[LAUS] G. Lauss, F. Lehfuss, „Safety Issues for Power-Hardware-in-the-Loop Simulations“, IEEE Powertech 2013, Grenoble France

[LEHF] Lehfuss, F.; Lauss, G.; Kotsampopoulos, P.; Hatziaargyriou, N.; Crolla, P.; Roscoe, A.; „Comparison of multiple power amplification types for power Hardware-in-the-Loop applications,"Complexity in Engineering (COMPENG), 2012", „1-6,2012,IEEE

[Leitinger, 2011]: Netzintegration von solarer elektrischer Mobilität - Auswirkung auf das elektrische Energiesystem, Dissertation an der technischen Universität Wien, September 2011

[LERCH, 2010]: Christian Lerch, Fabian Kley, David Dalliner: "New business models for electric cars- a holistic approach", working paper Sustainability and Innovation No. S 5/2010, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, May 2010

[Litzlbauer, 2010]: M. Litzlbauer: Generation of stochastic load profiles for mobile energy storages; Vortrag: 2nd European Conference Smart Grids and E-Mobility, Brüssel; 20.10.2010 - 21.10.2010; in: "Smart Grids and E-Mobility", OTTI, Regensburg, (2010), ISBN: 978-3-941785-14-4; S. 208 – 215

[MOHAN, 1995] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins: „*Power Electronics – Converter, Applications and Design*“, 2. Auflage 1995, John Wiley & Sons, Inc. New York

[MONT] A. Monti, H.. Figueroa, S. Lentijo, X. Wu and R. Dougal, "Interface Issues in Hardware-in-the-Loop Simulation" , IEEE Electric Ship Technologies Symposium ESTS, pp. 39- 45, July 2005

[MYRZIK, 2000] J. Myrzik: „*Topologische Untersuchungen zur Anwendung von tief/hochsetzenden Stellern für Wechselrichter*“, 2000, Universität Kassel

[NPE, 2010] Nationale Plattform Elektromobilität: „*Die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 1*“ Geschäftsstelle der Nationalen Plattform Elektromobilität AG, Ingolstadt, November 2010

[NYNS, 2010]: Kristien Clement-Nyns, Edwin Haesen, Johan Driesen (2010): "The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid", Paper in journal Electric Power Systems Research, doi:10.1016/j.epsr.2010.08.007, in press, 2010

[PB, 2012] Physikerboard; U-I-Kennlinie einer Solarzelle,

<http://www.physikerboard.de/topic.12098,-kennlinie-einer-solarzelle.html> (Datum 04.04.2012, 09:00)

[PE1, 2007] W. Choi, S. Young: „Advanced Switches – Boost PFC“

URL: <http://powerelectronics.com/mag/706PET23.pdf> (Datum 23.12.2011, 13:00)

[PE2, 2008] J. Hancock: „Bridgeless PFC Boosts“

URL: <http://powerelectronics.com/mag/802PET20.pdf> (Datum 23.12.2011, 13:30)

[Peterson,2009]: S. B. Peterson, J. Apt, J.F. Whitacre: Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization, Journal of power sources, doi:10.1016/j.jpowsour. 2009.20.010, in press

[REGELLEISTUNG, 2011a]: „Präqualifikationsunterlagen für die Ausschreibung und Erbringung von Primärregelleistung für die Regelzone APG“, Information der Homepage <http://www.regelleistung.at/regelwerk/praequalifikationsbedingungen> (Datum: 11.04.2011, 15:40 Uhr)

[REGELLEISTUNG, 2011b]: „Primäre Regelleistung und die Funktionsweise der Ausschreibung“, Information der Homepage www.regelleistung.at (Stand: Januar 2011), 2011

[REGELLEISTUNG, 2011c]: „Ergebnisse der Ausschreibung vom Bedarf an Sekundärleistung in den vier Regelzonen in Deutschland“ Information der Homepage [Regelleistung.net](http://www.regelleistung.net), <https://www.regelleistung.net/regelleistungWeb/publicAusschreibungen/choose.do> (Datum: April 2011)

[REN1] W. Ren, M. Steuer and T. L. Baldwin, Improve the Stability and the Accuracy of Power Hardware-in-the-Loop Simulation by Selecting Appropriate Interface Algorithms“, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 4, pp. 1286-1294, July 2008

[REN2] W. Ren, M. Sloderbeck, M. Steurer, V. Dinavahi, T. Noda, S. Filizadeh, A. R. Chevretils, M. Matar, R. Iravani, C. Dufour, J. Belanger, O. M. Faruque, K. Strunz, and J. A. Martinez, "Interfacing Issues in Real-Time Digital Simulators", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 1221–1230, April 2011

[SCHW] M. Schweizer, J. W. Kolar: High efficiency drive system with 3-level T-type inverter. In: Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). 2011, ISBN 9789075815153, S. 1–10.

[SHEP] C. M. Shepherd, Design of Primary and Secondary Cells, II . An Equation Describing Battery Discharge, *J. Electrochem. Soc.* 1965, <http://jes.ecsdl.org/content/112/7/657.short>

[SIEMENS, 2012] Produktbroschüre CP700A,

<http://www.carporte.de/uploads/easysolarcarport/bilder/ladesaeule.pdf> (Datum 08.08.2012, 12:00)

[SPIEL, 2007] S. Spielauer, „Evaluation of the Performance of Maximum Power Point Tracking Methods“ Diplomarbeit, TU-Wien, Jänner 2007

[STEINBÖCK, 2011]: Steinböck, Marvin: „Integration of electric vehicles in a smart grids platform: The case of Austria“, Diplomarbeit an der technischen Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Betreut von: Prof. Reinhard Hass und DI Rusbeh Rezaia, April 2010

[TARTER, 1993] R. Tarter: „Solid-State Power Conversion Handbook“, 1993, John Wiley & Sons, Inc. New York

[TAO] L. Tao, L. Mo, S. Liu, and R. X. Gao, "Optimal battery charge and discharge control scheme under solar power inflow," in Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 849 –854.

[TENNET, 2011]: „Ergebnisse der Ausschreibung der Sekundärregelleistung“, Information der Homepage des Regelzonenführers EnBW Transportnetze AG, URL: http://www.tennetso.de/pages/tennetso_de/Transparenz/Veroeffentlichungen/Netzkennzahlen/Einsatz_Regelleistung/Tatsaechlich_abgerufene_Sekundaerregelleistung/index.htm (Datum: April 2011)

[TOMIĆ, 2007]: Jansa Tomić, Willet Kempton: "Using fleets of electric drive vehicles for grid support", Paper in Journal of power sources, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.03.010, in press

[TRE1] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, and A.-I. Dekkiche, "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles," in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007, 2007, pp. 284 – 289.

[TRE2] O. Tremblay and Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications," World Electric Vehicle Journal, 2009.

VDE, 2009]: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., „Transmission Code 2007 Anhang D2 Teil 1 Unterlagen zur Präqualifikation von Anbietern zur Erbringung von Sekundärregelleistung für die ÜNB“, November 2009

[VIEH] A. Viehweider, G. Lauss, F. Lehfuss, Stabilization of Power Hardware-in-the-Loop simulations of electric energy systems, Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 19, Issue 7, August 2011, Pages 1699-1708, ISSN 1569-190X, 10.1016/j.simpat.2011.04.001.

[YAZAKI, 2012] CHAdeMO DC-Stecker, http://charge.yazaki-group.com/english/product/quick_outlet_jp.html
(Datum 07.06.2012, 12:00)

6.2 Abbildungsverzeichniss

Abbildung 1: Schematische Projektdarstellung	7
Abbildung 2: Auszug relevanter Normen und Projekte zur Ladeschnittstelle [NPE, 2010]	15
Abbildung 3: Funktionsblöcke des V2G-inverters (Die Energieflussrichtung wird durch die blauen Pfeile symbolisiert)	17
Abbildung 4: Systemarchitektur als Blockschaltbild der Leistungskomponenten	24
Abbildung 5: Blockschaltbild des DSP Controllers	26
Abbildung 6: Regelungsstruktur, Software Konzept	27
Abbildung 7: Userinterface zum Versuchsaufbau	27
Abbildung 8: Blockschaltbild der Potentialtrennung - Serienresonanzwandler	28
Abbildung 9: Blockschaltbild des Hoch/Tiefsetzstellers - interleaved	29
Abbildung 10: Blockschaltbild des Hoch/Tiefsetzstellers zur PV-Anbindung	30
Abbildung 11: Vergleich von Simulation und experimentellen Daten	31
Abbildung 12: Diese Aufnahme zeigt schlechte Aluminium-Kantenbedeckung in den Kontakten auf Scheibe No 10	31
Abbildung 13: Auf Scheibe No 6 bestätigten einwandfreie Kontakte die Zielvariante des Metallisierungsprozesses	32
Abbildung 14: Demonstratoren im Plastikpackage für die Verifikationsmessungen	32
Abbildung 15: Konzept für die Ansteuerung	33
Abbildung 16: Auszug der Charakterisierungsergebnisse	35
Abbildung 17: Auszug der Charakterisierungsergebnisse, Kapazitätsverläufe über $V(ds)$	36
Abbildung 18: Wirkungsgradmessung der IGBTs bei 41,5kHz und Boost-Betrieb	37
Abbildung 19: SiC-Treiberschaltung und Anordnung der Kaskode	38
Abbildung 20: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 50kHz und Boost-Betrieb	39
Abbildung 21: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 70kHz und Boost-Betrieb	40
Abbildung 22: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 120kHz und Boost-Betrieb	40
Abbildung 23: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 150kHz und Boost-Betrieb	41
Abbildung 24: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 43kHz und Buck-Betrieb	41
Abbildung 25: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 50kHz und Buck-Betrieb	42
Abbildung 26: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 70kHz und Buck-Betrieb	42
Abbildung 27: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 120kHz und Buck-Betrieb	43
Abbildung 28: Wirkungsgradmessung der SiC J-FETs bei 150kHz und Buck-Betrieb	44
Abbildung 29: Drossel für hohe Schaltfrequenzen (120kHz / 150kHz)	45
Abbildung 30: Drossel für niedrige Schaltfrequenzen (40kHz / 70kHz)	46
Abbildung 31: Übersicht V2G-Inverter PHIL Versuchsaufbau	47
Abbildung 32: Nyquist Plot des V2G-inverter PHIL Versuchsaufbaus ohne Stabilitätsmaßnahmen	48
Abbildung 33: Nyquist Plot des Stabilisierten V2G Inverter PHIL Versuchsaufbaus	48
Abbildung 34: Spannungs und Stromverläufe, AC und DC Seitig bei 5A Entladestrom	50
Abbildung 35: Spannungs und Stromverlauf, AC und DC Seitig bei 10A Entladestrom	50
Abbildung 36: DC Spannung und Strom bei Tiefentladung der Batterie	51

Abbildung 37: DC und AC Seitige Spannung und Strom bei Sprunghafter Änderung des SoC von 0,4 auf 0 und retour. AC Seitig wird zwecks Übersichtlichkeit nur 1 Phase dargestellt	52
Abbildung 38: DC und AC Spannungen und Ströme bei einer Sprunghaften Änderung des Entladestromes. AC Seitig ist zwecks der Übersichtlichkeit nur 1 Phase dargestellt.....	53
Abbildung 39: Darstellung der 3 AC Phasen.....	54
Abbildung 40: Auswirkung des hohen Durchdringungsgrades der PV-Anlagen und E-Fahrzeuge auf Summenlastprofil eines Niederspannungsnetzes	57
Abbildung 41: Ein ländliches Niederspannungsnetz mit Abschätzung der Anzahl der Wohneinheiten je Anschlusspunkt (vgl. Projekt V2G-Strategies)	58
Abbildung 42: Summenlastprofil des dargestellten NS-Netzes (siehe Abbildung 2).....	58
Abbildung 43: Ladestand der Batterie (maximale Kapazität 24 kWh) eines E-Fahrzeugs basierend auf beschriebenen erzeugungs- und verbrauchsorientierten Lade-/Entladestrategien.....	59
Abbildung 44: Wöchentlicher Integrationsgrad der PV-Anlagen	61
Abbildung 45: Deckungsbeiträge des Entladevorgangs der E-Fahrzeuge von 19:00 Uhr bis 21:00 Uhr für unterschiedlichen Batterieinvestitionskosten	63
Abbildung 46: Deckungsbeiträge des Entladevorgangs mit der Variation der Batterieinvestitionskosten und mittlerem Energiepreis.....	63

7 Anhang

Deliverable 2

Deliverable 3.1

Deliverable 3.2

Deliverable 4.1&4.2

Deliverable 6

8 Kontaktdaten

Felix Lehfuß,

Energy Department, Electric Energy Systems, AIT Austrian Institute of Technology
Donau City Strasse 1 | 1220 Vienna | Austria | T +43(0) 50550-6686 | F +43(0) 50550-6390

Gerald Fenz,

Siemens Industrial Manufacturing Engineering and Applications (SIMEA)
Siemensstrasse 92, 1220 Vienna Austria | T +43(0)5170729819

Harald Koffler,

Infineon Technologies AG
Siemensstrasse 2, 9500 Villach Austria | T +43(0)6765523611

Wolfgang Prügler,

Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
Gußhausstraße 25-25a, 1040 Vienna, Austria | T +43(1)58801370369

IMPRESSUM

Verfasser

AIT – Austrian Institute of Technology

Giefinggasse 2, 1210 Wien

Tel: +4350550 – 6686

Fax: +4350550-6390

E-Mail: felix.lehfuss@ait.ac.at

Web: www.ait.ac.at

AutorInnen

- Lehfuss Felix
- Fenz Gerald
- Rusbeh Rezanian
- Koffler Harald

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH