

Verbundvorhaben „iFilter“

Intelligente Entstörelektronik für netzgekoppelte Stromrichter

Förderkennzeichen 6ME0405K

Schlussbericht

Grass Power Electronics GmbH

Preißlerstr. 11

90429 Nürnberg

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

LGF
Filter



HOCHSCHULE COBURG

ohm Technische
Hochschule
Nürnberg



Grass Power Electronics GmbH



Inhalt:

| | |
|---|-----------|
| 1. Kurze Darstellung | 3 |
| 1.1. Voraussetzungen | 4 |
| 1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens | 4 |
| 1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand..... | 4 |
| 1.4. Zusammenarbeit mit Projektpartnern | 4 |
| 2. Eingehende Darstellung | 5 |
| 2.1. Kritische Betriebsbereiche definieren und analysieren..... | 5 |
| 2.2. Analyse der Schwachstellen von Netzfiltern nach Stand der Technik | 7 |
| 2.3. Aufbau eines Batteriespeichersystems nach Stand der Technik..... | 7 |
| 2.3.1. AP3.3 Durchführung von Referenzmessungen des Hochfrequenzspektrums. 7 | |
| 2.4. Optimierte Auslegung der induktiven Bauelemente..... | 7 |
| 2.5. I-Filtergeneration (Intelligent Filter)..... | 8 |
| 2.5.1. AP5.2 Integrierte Messung aktuelles Oberwellenspektrum..... | 8 |
| 2.5.2. AP5.3 Elektronik-Testschaltungen zur Messsignalaufbereitung..... | 8 |
| 2.5.3. AP5.4 Entwicklung einer Elektronik-Baugruppe zur Messwertaufbereitung | 9 |
| 2.6. Prädiktive Modelle und KI-Algorithmen zur Optimierung des Systemverhaltens..... | 10 |
| 2.6.1. AP6.1 Modellerstellung des Gesamtsystems..... | 10 |
| 2.6.2. Offline-Training eines neuronalen Netzwerks | 11 |
| 2.6.3. AP6.4 Modellprädiktivem Ansatz | 11 |
| 2.6.4. AP6.6 Toolchain zur Code-Generierung | 11 |
| 2.6.5. AP6.7 weitere Optimierung der Algorithmen..... | 12 |
| 2.7. Integration der Algorithmen in das Umrichter-Regelungs-System..... | 12 |
| 2.7.1. AP7.1 Implementierung Algorithmen in DSP-Regelung | 12 |
| 2.7.2. AP7.2 Minimierung Rechenzeit | 14 |
| 2.7.3. AP7.3 Module-Test der Algorithmen in DSP-Regelung | 14 |
| 2.8. Aufbau eines Batteriespeichersystems mit AFE und I-Filter..... | 15 |
| 2.8.1. AP8.1 Entwicklung Treiber-Testschaltungen | 15 |
| 2.8.2. AP8.2 Entwicklung Treiber-Baugruppen..... | 16 |
| 2.8.3. AP8.3 Test Treiber-Baugruppen..... | 16 |
| 2.9. Test im Gesamtsystem..... | 18 |
| 2.9.1. 9.1 Verhalten in gesamtem Betriebsbereich | 19 |
| 2.9.2. Bewertung Messergebnisse | 19 |
| 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten | 19 |
| 4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses | 19 |
| 4.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten..... Fehler! Textmarke nicht definiert. | |
| 4.2. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten | 20 |
| 4.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit..... | 20 |
| 5. Veröffentlichungen | 20 |
| 5.1. Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen..... | 21 |
| 5.2. Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen..... | 21 |

1. Kurze Darstellung

Der Einsatz von Leistungselektronik in modernen Komponenten der Energieversorgung (z.B. Batteriespeicher, DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge, Hilfsbetriebeumrichter für Bahnen, Medizintechnik, PV-Anlagen, Strangregler etc.) stellt zunehmend hohe Anforderungen an deren elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Neue Halbleitergenerationen erlauben deutlich schnellere Schaltvorgänge, wodurch einerseits die Effizienz und Baugröße verbessert werden, andererseits jedoch leitungsgebundene Störemissionen in höhere Frequenzbereiche verlagert werden und gleichzeitig höhere Störströme entstehen. Das Projekt iFilter hat für diese Problematik einen systematischen Ansatz entwickelt, bei dem wesentliche Eigenschaften von EMV-Filtern und Stromrichtern im Betrieb durch intelligente Softwarealgorithmen so koordiniert werden, dass das Gesamtsystem die EMV-Anforderungen im gesamten Betriebsbereich erfüllt und gleichzeitig eine Überdimensionierung, die zu hohen Kosten und Platzbedarf führen würde, vermieden wird.

Im Projektteam wurde das System aus neuentwickeltem „intelligenten Filter“ und KI-Algorithmen an einem Stromrichter für Batteriespeicher erprobt und optimiert werden. Die Speicher sind besonders nachhaltig, da sie aus sog. „Second Life Batterien“ von Elektrofahrzeugen aufgebaut sind und zur Schnellladung von Elektrofahrzeugen verwendet werden, so dass trotz hoher Ladeleistungen das Stromnetz moderat belastet wird. Der Markt für derartige Speicher etabliert sich derzeit, neuere Elektrofahrzeuge ermöglichen immer höhere Ladeleistungen. Die Projektergebnisse sollen im Anschluss auch für weitere Anwendungsbereiche eingesetzt werden, da die genannte Problematik grundsätzlich bei nahezu allen Anwendungen der Leistungselektronik auftritt. Der Projektpartner LGF sieht konkrete Anwendungen im Bereich Medizin-, Aufzugs- und Bahntechnik.

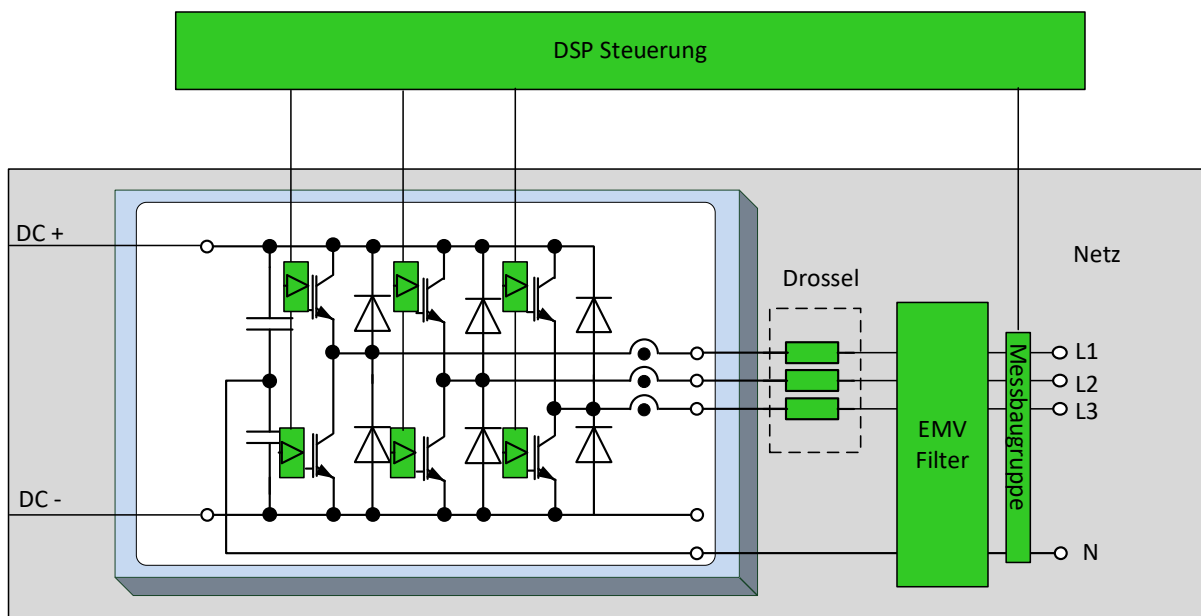


Bild 1: Im Projekt entwickelte Komponenten in grün eingezeichnet

Wesentliche Komponenten, die im Projekt entwickelt wurden:

- EMV Sensor und Messbaugruppe
- EMV Filter
- Netzdrossel
- Treiberbaugruppen der Leistungshalbleiter
- KI gestützte Software in der DSP Echtzeitsteuerung

1.1. Voraussetzungen

Das Labor von GPE ist mit einer eigenen Netzeinspeisung ausgestattet, so dass Stromrichter mit höheren Leistungen im Betrieb untersucht werden konnten. Elektromagnetische Emissionen sind im Testbetrieb aufgrund der Lage des Labors in einem separaten Gebäude unproblematisch. Deshalb konnten alle im Projekt entwickelten Komponenten an Stromrichtern unter realen Netzbedingungen erprobt werden. Dafür stand ein Stromrichter mit einer Leistung von 100 kW zur Verfügung, der entsprechend modifiziert werden konnte.

1.2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die vorgesehene Laufzeit des Projektes betrug 3 Jahre im Zeitraum vom 01.10.2021 bis 30.09.2024. Aufgrund von Verzögerungen am Anfang und im Verlauf des Projekts wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um 6 Monate bis zum 31.03.2025 durchgeführt. Bis zum Projektabschluss konnten alle wesentlichen Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen werden. Zur Implementierung der Steuerungs- und Regelungstechnik stand ein leistungsfähiges DSP-System mit Kommunikationsanschlüssen zur Verfügung. Die echtzeitkritische Steuerungssoftware steht als Framework für leistungselektronische Anwendungen zur Verfügung und ist ebenfalls eine Eigenentwicklung. Die Leistungsteile, die Steuerelektronik und die Steuerungssoftware sind komplett im Hause entwickelt worden, so dass im Projekt an jeder gewünschten Stelle des Systems Änderungen durchführbar waren.

Um den Projektfortschritt zu koordinieren und das weitere Vorgehen zu planen, wurden während der gesamten Projektlaufzeit monatliche Statustreffen abgehalten.

GPE übernahm in Absprache mit den Projektpartnern die Projektleitung und Organisation.

1.3. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Neue Leistungshalbleiter ermöglichen deutlich kürzere Schaltzeiten als dies in der Vergangenheit mit Halbleitern aus Silizium möglich war. Dadurch können Schaltverluste deutlich verringert werden und die Schaltfrequenzen erhöht werden. Dies erlaubt die Verwendung kleinerer Induktivitäten, so dass die Baugröße und das Gewicht solcher Anlagen verkleinert werden können. Allerdings entstehen durch die schnelleren Schaltvorgänge auch höherfrequente elektromagnetische Störemissionen. Üblicherweise werden zur Dämpfung EMV Filter eingesetzt, die entsprechend dimensioniert werden. Auch eine Verlangsamung der Schaltgeschwindigkeit kann helfen, die Störemissionen zu verringern, allerdings mit dem Nachteil höherer Verlustleistung.

Es gibt auch Simulationsmodelle zur Nachbildung der Ausbreitungen von elektromagnetischen Störungen auf Leitungen. Teilweise werden auch empirische Methoden eingesetzt, um unerwünschte Kopplungen zu finden und zu beseitigen.

1.4. Zusammenarbeit mit Projektpartnern

GPE hat im Projekt iFilter die Koordination der Arbeiten übernommen und daher direkt mit allen beteiligten Partnern zusammengearbeitet.

GPE hat bei der Entwicklung der Ansteuerungen und der Frequenzanalyse mit dem Institut ELSYS zusammengearbeitet, wobei grundsätzliche Untersuchungen maßgeblich bei ELSYS stattfanden und die produktspezifische Umsetzung und die Integration in die Steuerungstechnik bei GPE durchgeführt wurden.

Die Hochschule Coburg führte umfangreiche Berechnungen und Simulation für magnetische Komponenten durch, die bei LGF dann in industrielle Betriebsmittel umgesetzt wurden. GPE konnte diese Betriebsmittel dann in den Stromrichtern betreiben. Testergebnisse und Messungen wurden gemeinsam von allen Projektpartnern durchgeführt und analysiert.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Kritische Betriebsbereiche definieren und analysieren

In Absprache der Projektpartner wurde bei ELSYS der aus einem vorherigen Projekt entstandene Doppelpuls-Versuchsstand so erweitert, dass auch die in den Stromrichtern von GPE eingesetzten IGBT-Module vermessen werden können. Da sich in Diskussion mit den Projektpartnern ergeben hatte, dass der kritische Arbeitsbereich mit dem vermutlich breitbandigen Störspektrum wahrscheinlich bei kalten Temperaturen auftritt, wurde der Versuchsstand so umgebaut, dass das IGBT-Modul inkl. Zwischenkreis und Ansteuerung inkl. der notwendigen Messungen in einer handelsüblichen Gefriertruhe betrieben werden konnten. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Annahme zutrifft und die Schaltflanken des IGBTs bei kalten Temperaturen steiler ausfallen. Im Anschluss an die vorläufig durchgeführten Doppelpuls-Schaltversuche aus dem vergangenen Berichtszeitraum wurde das aktuell bei GPE verwendete IGBT4-Modul SEMiX223GB12E4p sowie das in Zukunft angedachte IGBT7-Modul SEMiX223GB12M7p umfangreich vermessen, dabei wurden verschiedene Gate-Vorwiderstände, verschiedene Ströme, verschiedene Zwischenkreisspannungen und Chiptemperaturen untersucht.

Bei GPE wurden Messungen an Umrichtern aus der Serie zur Charakterisierung der Schalteigenschaften und der darin enthaltenen Spektren durchgeführt. Dabei wurden die Eigenschaften der netzseitigen Komponenten (Drossel und EMV Filter) betrachtet. Mit den Projektpartnern wurden insbesondere die HF-Eigenschaften der bisher verwendeten Netzdrossel diskutiert, um die Ausbreitungswege der leitungsgebundenen Störungen prinzipiell nachvollziehen zu können und kritische Eigenschaften (z.B. parasitäre Kapazitäten) zu lokalisieren. Analyse der Schwachstellen von Netzfiltern nach Stand der Technik.

Bei einem Trapezsignal im Zeitbereich ergibt sich das Spektrum aus *Abbildung 1*. Sowohl eine höhere Taktfrequenz als auch eine geringere Anstiegszeit t_r führen zu einem höheren Gehalt an Oberschwingungen. Man kann in guter Näherung eine einhüllende Linie finden (rot in *Abbildung 1*), die zwischen der Taktfrequenz und einer Frequenz $f_t = \frac{1}{\pi \cdot t_r}$ mit 20dB/Dekade fällt und oberhalb mit 40dB/Dekade.

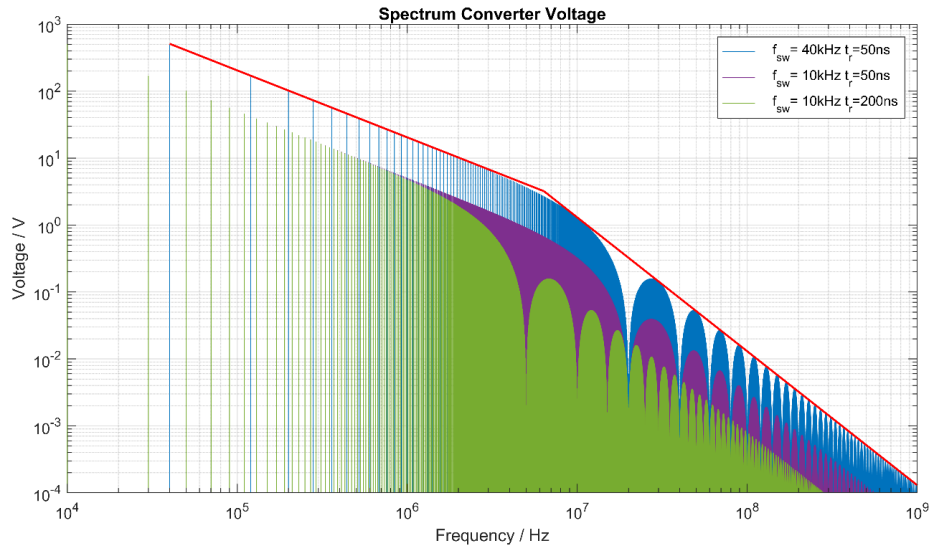


Abbildung 1: Spektrum ideales Trapezsignal

Da im MHz-Bereich die parasitären Elemente der Umrücherdrossel für eine deutliche Verringerung der Dämpfung sorgen, ist das Ziel, das Spektrum in diesem Frequenzbereich noch weiter abzuschwächen. Dies ist bei gleicher Anstiegszeit und Taktfrequenz beispielsweise dadurch möglich, den Übergang nicht „linear“ zu formen, sondern beispielsweise näherungsweise parabelförmig. Dadurch ist es möglich, das Spektrum vor allem im hohen Frequenzbereich zu formen wie *Abbildung 2* zeigt.

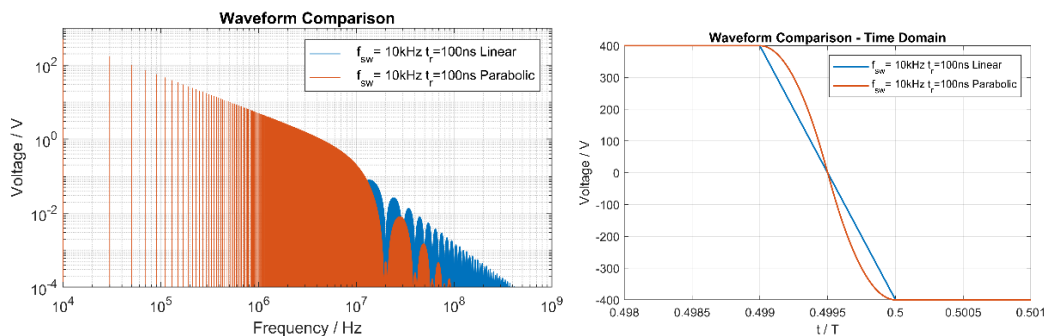
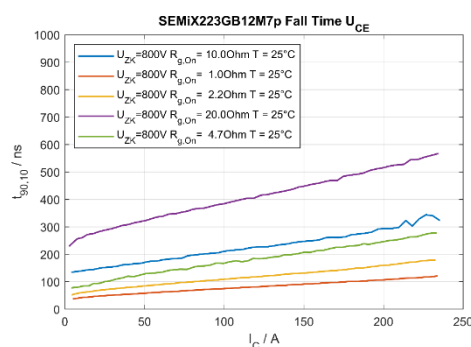
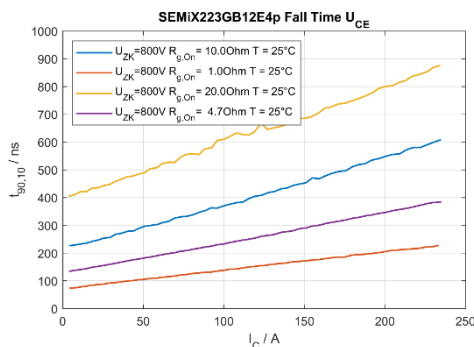


Abbildung 2: Spektrum und Zeitverlauf Trapezsignal mit linearem und parabolischem Übergang

Es wird deutlich, dass die Anstiegszeit für den betrachteten Frequenzbereich entscheidend ist. In den Schaltversuchen wird die Anstiegs- und Abfallzeit daher ermittelt. Beispielhaft sind in *Abbildung 3* mehrere Schaltzeiten zu sehen. Dabei fällt auf, dass bei einfacherer Variation des Gate-Vorwiderstands mit einem Standard-Treiber vor allem die Abfallzeit verändert werden kann, die Anstiegszeit ist vor allem vom Strom abhängig.



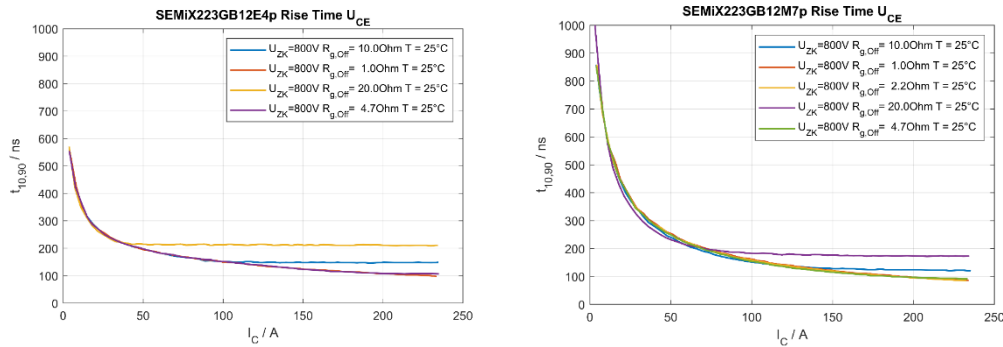


Abbildung 3: Anstiegs- und Abfallzeiten anhand von Schaltversuchen

Während des Berichtszeitraums wurde auf der EPE 2022 das Paper „EMI Mitigation Induced by an IGBT Driver Based on a Controlled Gate Current Profile“ (Martinez, Monmasson, Patin) veröffentlicht. In diesem wird beschrieben, wie das Spektrum eines IGBTs mit einem speziellen Ansteuerprofil optimiert werden kann. Es ist daher möglich, die Anstiegs- und Abfallzeiten zu verändern, wenn statt eines einfachen Treibers die präsentierte Methodik angewandt wird. Das Design des zu entwickelnden Treibers (AP 8) wurde daraufhin so abgewandelt, dass diese Methodik im folgenden Berichtszeitraum in realen Schaltversuchen getestet werden kann.

Basierend auf den Schaltversuchen aus AP1.2 und der Vermessung der bei GPE eingesetzten Umrichterrossel und Netzfilter, die vom Projektpartner HSC durchgeführt worden ist, können nun in LTspice Wechselwirkungen und Resonanzen untersucht werden. Dabei deutet sich als mögliche Schwachstelle des bisherigen Systems eine Serienresonanz im Bereich 1...10MHz an, die simulativ bestätigt werden konnte.

2.2. Analyse der Schwachstellen von Netzfiltern nach Stand der Technik

2.3. Aufbau eines Batteriespeichersystems nach Stand der Technik

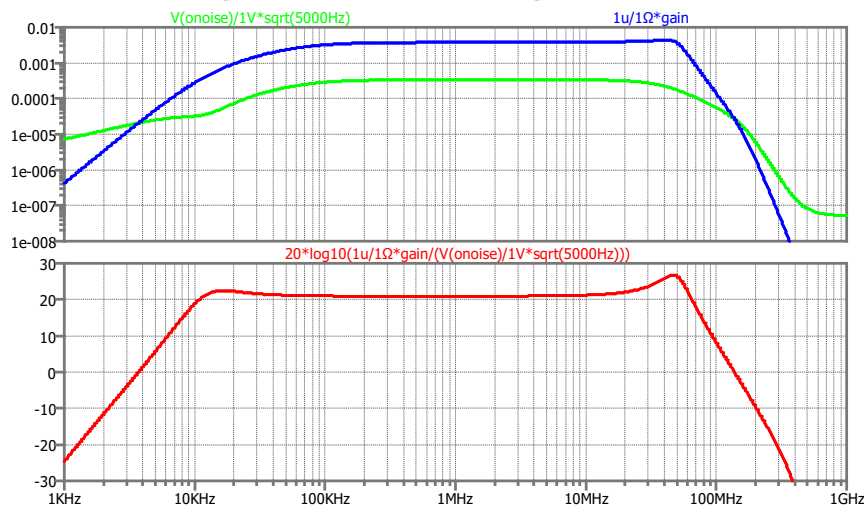
2.3.1. AP3.3 Durchführung von Referenzmessungen des Hochfrequenzspektrums

Zusammen mit dem Projektpartner GPE wurden verschiedene Messungen des netzseitig emittierten Spektrums durchgeführt und diskutiert, die gefundenen Schwachstellen können mit Hilfe des Modells aus AP6.1 erklärt werden.

2.4. Optimierte Auslegung der induktiven Bauelemente

Zusammen mit dem Projektpartner GPE wurden verschiedene Messungen des netzseitig emittierten Spektrums durchgeführt und diskutiert, die gefundenen Schwachstellen können mit Hilfe des Modells aus AP6.1 erklärt werden.

2.5. I-Filtergeneration (Intelligent Filter)



2.5.1. AP5.2 Integrierte Messung aktuelles Oberwellenspektrum

Um die Schaltgeschwindigkeit im Laufenden Betrieb sinnvoll einzustellen, ist eine ständige Messung des Oberschwingungsspektrums vorgesehen worden. Dazu wurden mit den Projektpartnern HSC, LGF und GPE verschiedene Lösungsmöglichkeiten diskutiert, wie das Spektrum als Messsignal aus dem Hauptstrompfad ausgekoppelt werden kann. Dabei wurden Aspekte wie die Signalstärke, die Störfestigkeit, der abdeckbare Frequenzbereich sowie die Kosten der Lösungen abgeschätzt. Dabei stellte sich als Optimum die Auskopplung des Signals mittels niederpermeablen Ringkerns heraus. ELSYS hat auf dieser Basis in AP5.3 einen Vorschlag für eine Messverstärkerschaltung ausgearbeitet. Eine Übersicht ist in Abbildung 4 zu sehen.

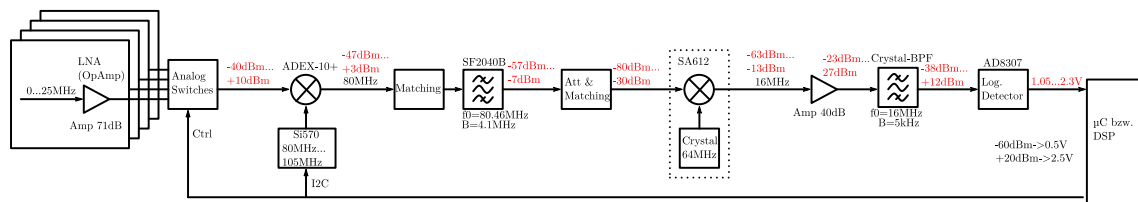


Abbildung 4: Übersichtsbild Elektronikschaltung für Oberschwingungsmessung

2.5.2. AP5.3 Elektronik-Testschaltungen zur Messsignalaufbereitung

Als kritischer Punkt für die Oberschwingungsmessung wird das Signal-Rausch-Verhältnis am Eingang der Schaltung identifiziert. Dadurch ist es notwendig, die Low Noise Amplifier (LNA) gezielt auf ein optimales Rauschverhalten auszulegen. Das Ziel ist, bei dem schwächsten noch zu detektierenden Signalpegel ein Signal-Rausch-Verhältnis von 20dB zu erreichen. Mit der im folgenden dargestellten Schaltung wurde dieses Ziel im Frequenzbereich 10kHz...100MHz erreicht, wie die rote Kurve aus Abbildung 6 zeigt.

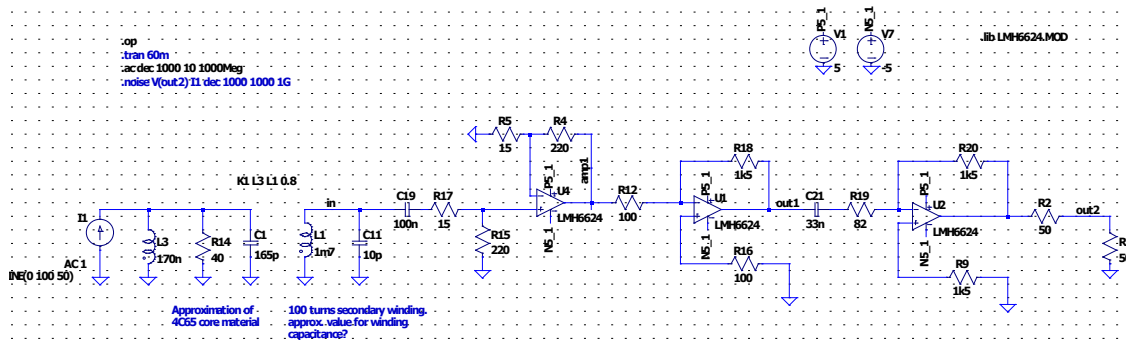


Abbildung 5: Realisierung Low Noise Amplifier für Oberschwingungsmessung

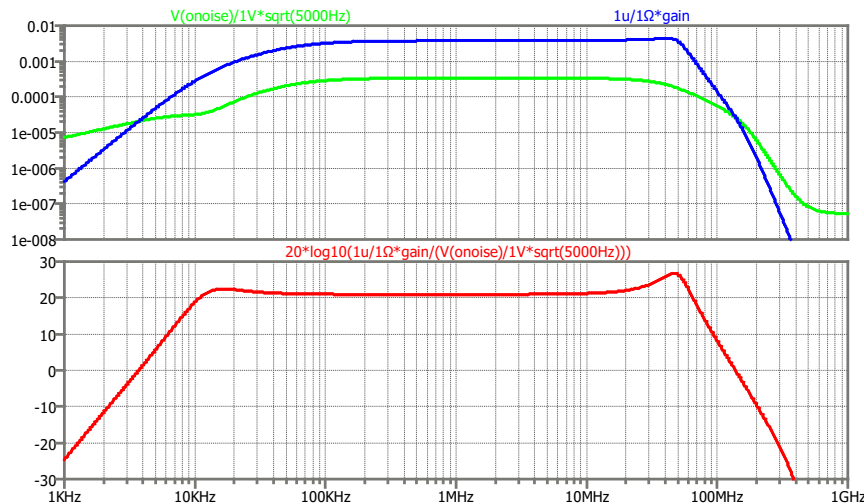


Abbildung 6: Simulationsergebnis Rauschanalyse

2.5.3. AP5.4 Entwicklung einer Elektronik-Baugruppe zur Messwertaufbereitung

Die Elektronikschaltung zur Messung der Oberschwingung, die bereits im vergangenen Berichtszeitraum konzipiert worden ist und in Abbildung 4 zu sehen ist, wurde von GPE als Leiterplatte realisiert. Die Entwicklung wurde in gemeinsamen Reviews von Schaltplan und Layout von ELSYS begleitet, das Layout und die reale Platine ist in Abbildung 7 zu sehen.

Technische Schwierigkeit war insbesondere die Auslegung der Eingangs-Verstärkerkette, die auf eine niedrige Rauschzahl optimiert werden musste, damit der Signal-Rauschabstand bei den kleinen zu erfassenden Eingangssignalpegeln immer noch ausreichend ist. Dabei musste der komplette Frequenzbereich bis über 30 MHz mit möglichst gleichmäßigem Betragsgang abgebildet wurde.

Es wurden bereits umfangreiche Tests des Übertragungsverhaltens durchgeführt, allerdings standen die Strom-Wandler zur Signalauskopplung noch nicht zur Verfügung.

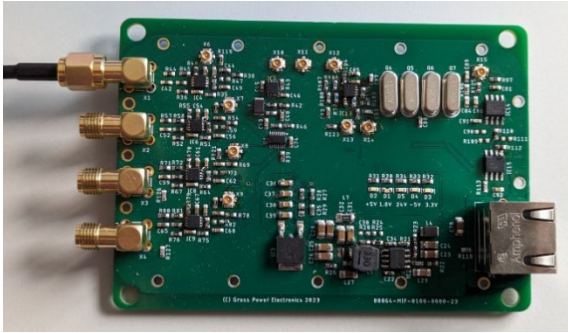


Abbildung 7: Platine zur Oberschwingungserfassung (a): Layout, (b): bestückte Baugruppe

2.6. Prädiktive Modelle und KI-Algorithmen zur Optimierung des Systemverhaltens

2.6.1. AP6.1 Modellerstellung des Gesamtsystems

Die Erkenntnisse aus AP1.3 werden verwendet, um ein Modell des Gesamtsystems zu erzeugen. Da die EMV-Messung eine Resolution Bandwidth von 9kHz verwendet, ist es legitim, die einhüllenden Kurven des detaillierten Spektrums von *Abbildung 2* zu verwenden. Diese wird mit Hilfe der Laplace-Transformation generiert. Die Ausgangsimpedanz des Umrichters ist dabei deutlich geringer als 50Ohm und liegt im Milliohm-Bereich. Das so modellierte Spektrum des Umrichters dient als Eingangssignal des Modells der Hauptdrossel und des Netzfilters, welche von der Hochschule Coburg anhand der realen Bauelemente generiert und bereitgestellt wurden. Konkret zeigt nachfolgende Abbildung die Simulationsanordnung für das Common Mode Störverhalten.

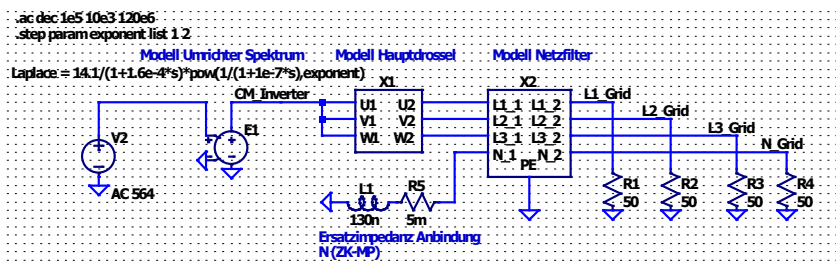


Abbildung 8: Modellierung des Gesamtsystems

Durch weitere Gespräche mit Projektpartner GPE und Kollegen an der TH Nürnberg wurde Fuzzy Logic als KI-Methodik im Anwendungsgebiet für zielführend erkannt. Insbesondere die regelbasierte Verknüpfung von Eingangssignalen über unscharfe Mengen konnte als einfach implementierbar und regelungstechnisch stabil und dennoch performant herausgearbeitet werden. Insbesondere war es damit möglich, Eigenschaften von intern im System vorhandenen Signalen und deren Informationsgehalt zur Bestimmung von elektromagnetischen Emissionen zu verwenden.

Die Modellierung konnte mit den folgenden Eingangsgrößen eine erste Systembeschreibung erstellt werden:

Laststrom (Höhe), incl. Sinusmodulation

Temperatur der Halbleiter

Messwert der elektromagnetischen Emissionen (bzw. ein Erwartungswert dafür)

2.6.2. Offline-Training eines neuronalen Netzwerks

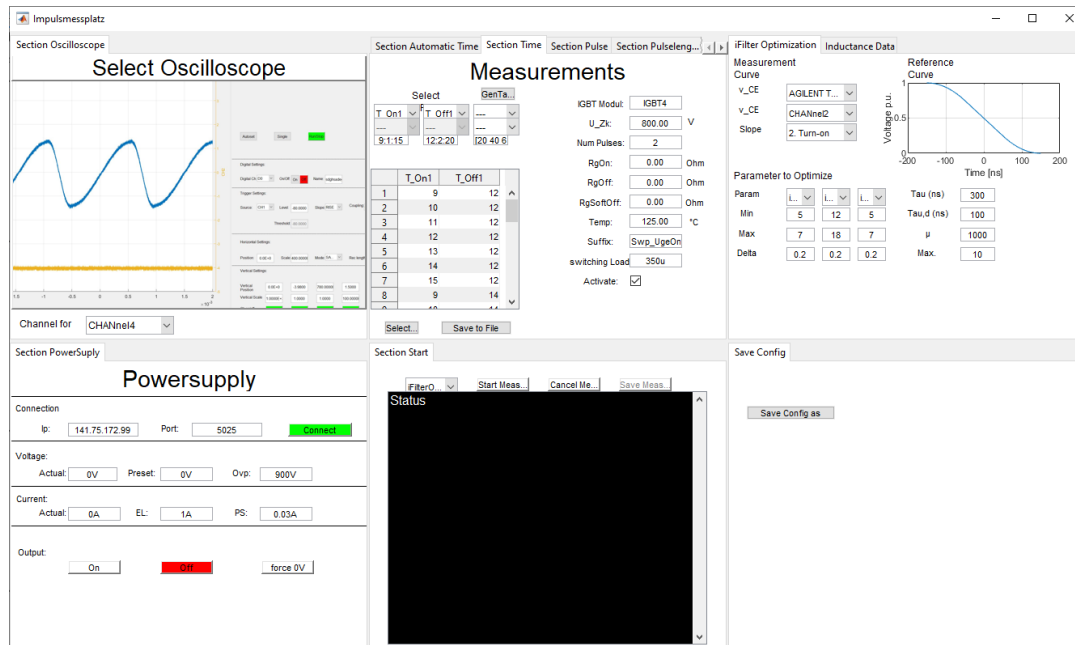


Abbildung 9: MATLAB-Applikation zum automatisierten Aufnehmen von Schaltvorgängen

Für die Entwicklung eines neuronalen Netzwerks, das optimale Einstellungen für den iFilter-Treiber vorschlägt, wurde die bestehende Automatisierungssoftware um Funktionen erweitert, um Trainingsdaten effizient zu sammeln. Die Benutzeroberfläche, über die diese Versuche gesteuert werden können, ist in Abbildung 9 dargestellt.

2.6.3. AP6.4 Modellprädiktivem Ansatz

Gemeinsam mit Projektpartner ELSYS wurde eine Bewertung des Verfahrens und der Simulationsergebnisse durchgeführt. Besonders berücksichtigt wurde dabei Implementierbarkeit bzw. Ausführbarkeit in den LVL1 und LVL2 Controlsystemen von GPE.

Der bereits erstellte Ansatz wurde in das Fuzzy Logic System transferiert. Die Ergebnisberechnung wurde nach dem Verfahren des „Flächenschwerpunkts“ durchgeführt und lieferte in der Simulation nachvollziehbar stabile Ausgangssignale für die Ansteuergeschwindigkeit der Halbleiter. In einer weiteren Untersuchung wurden die Verknüpfungsergebnisse mit virtuellen Kostenfunktionen bewertet, um die Optimierungsziele schneller und mit weniger Rechenoperationen zu erreichen.

2.6.4. AP6.6 Toolchain zur Code-Generierung

Bei Projektpartner GPE wurde eine Toolchain zur Erstellung des Systems entwickelt. Für die Systemeingabe wurde das Program FuzzyLite eingesetzt. Damit konnte automatisiert C++ Code generiert werden. Aus diesem System konnten angepasste ausführbare Bibliotheken für das Linux-Level2 System von GPE generiert werden, die das Anwendungsprogramm benötigt. Damit konnte die Aktionskette von Level 2 über

Level 1 umgesetzt werden. Bei ELSYS wurde die Toolchain auch eingerichtet, so dass die AP 6.1 erstellten Modelle in ausführbaren Code umgesetzt und getestet werden konnten.

Es wurde eine Toolchain zur Erstellung des Systems entwickelt. Für die Systemeingabe wurde das Program FuzzyLite erworben und eingesetzt. Damit konnte automatisiert C++ Code generiert werden. Aus diesem System konnten angepasste ausführbare Bibliotheken für das Linux-Level2 System von GPE generiert werden, die das Anwendungsprogramm benötigt. Damit konnte die Aktionskette von Level 2 über Level 1 umgesetzt werden.

2.6.5. AP6.7 weitere Optimierung der Algorithmen

ELSYS erstellte eine Simulationsumgebung, mit der die Untersuchung des Systemverhaltens deutlich effizienter am PC durchgeführt werden konnte. Damit konnte das System mit abgespeicherten Messdaten offline optimiert werden. Durch Vereinfachungen und Zusammenfassungen konnte damit auch der im Code für das Zielsystem von GPE optimiert und vor allem mit höherer Performance ausgeführt werden.

Nach ersten Tests wurde begonnen, eine Simulationsumgebung zu erstellen, mit der die Untersuchung des Systemverhaltens deutlich effizienter untersucht werden konnte. Damit können die Fuzzifizierungs- und Defuzzifizierungsfunktionen und auch die Regeln optimiert werden. Durch Vereinfachungen und Zusammenfassungen kann damit auch der im Code für das Zielsystem optimiert und vor allem mit höherer Performance ausgeführt werden.

2.7. Integration der Algorithmen in das Umrichter-Regelungs-System

2.7.1. AP7.1 Implementierung Algorithmen in DSP-Regelung

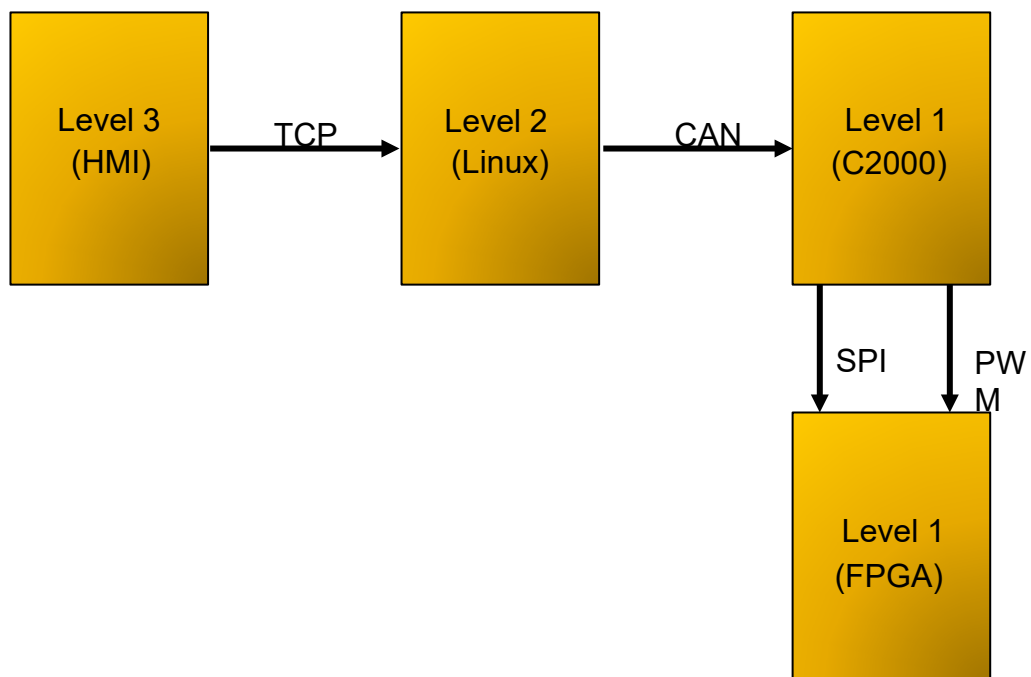


Abbildung 10 Implementierung der DSP-Regelung

Für die präzise Steuerung durch den Level 1 Controller (TI C2000 DSP) wurden zusätzliche Implementierungen erforderlich. Als Schnittstelle zwischen den Anwendern und dem C2000 fungiert der Level 2 Controller, welcher relevante Systemdaten, wie aktuelle Einstellparameter, an den Nutzer übermittelt. Dies ermöglicht dem Nutzer eine kontinuierliche Überwachung und Steuerung des Systems. Darüber hinaus bietet der Level 2 Controller die Möglichkeit für den Nutzer, über direkte Befehlseingaben mit dem C2000 zu kommunizieren.

Im Rahmen des iFilter Projekts wurde speziell für diese Zwecke eine angepasste Software für den Level 2 Controller entwickelt und umfassend getestet. Zusätzlich wurde die Software des Level1 Controllers für einen initialen Doppelpuls-Versuch konfiguriert. Dies ermöglicht dem Nutzer, über eine TCP-Verbindung mit dem Level2 Controller zu interagieren, der seinerseits über eine CAN-Schnittstelle mit dem Level1kommuniziert. Die gewonnenen Daten können somit in Echtzeit ausgelesen und entsprechende Steuerbefehle erteilt werden.

Des Weiteren ist der Level1 Controller über SPI und PWM direkt mit dem FPGA des iFilter-Treibers verbunden, was eine effiziente und responsive Systemperformance sicherstellt.

GPE hat hier die von ELSYS gelieferten Algorithmen in das DSP-Framework implementiert. Weiterhin wurden Modulationsverfahren, beispielsweise für die ARCP Topologie, implementiert.

| Parameter | Value | Dim |
|---------------------|-----------|-----|
| Start | 0 | |
| OpMode | 0 | |
| Num Pulses | 0 | |
| U_GE_Off_static | -8,0000 V | |
| U_GE_On_static | 16,000 V | |
| Nmb_steps_Turn_On | 2 | |
| Nmb_steps_Turn_Off | 2 | |
| Nmb_steps_Turn_sOff | 3 | |
| reserved | 0 | |
| reserved | 0 | |
| reserved | 0 | |
| UGE_On_1 | 8,0000 V | |
| TOn_1 | 150,00 ns | |
| UGE_On_2 | 14,000 V | |
| TOn_2 | 500,00 ns | |
| UGE_On_3 | 9,0000 V | |
| TOn_3 | 500,00 ns | |
| UGE_On_4 | 0,0000 V | |
| TOn_4 | 0,0000 ns | |
| UGE_On_5 | 0,0000 V | |
| TOn_5 | 0,0000 ns | |
| UGE_On_6 | 0,0000 V | |
| TOn_6 | 0,0000 ns | |

Abbildung 11 Darstellung der Einstellparameter des C2000 – Level3

Für die präzise Steuerung durch den Level 1 Controller (TI C2000 DSP) wurden zusätzliche Implementierungen für die echtzeitkritischen Steuerungsvorgänge durchgeführt. Die im DSP gebildete zum Netzstrom synchrone Sinusfunktion wurde zur phasenabhängigen Steuerung der Schaltgeschwindigkeit verwendet. Die Parametrierung konnte durch die Optimierung im Level2 System über eine CAN Datenverbindung realisiert werden.

2.7.2. AP7.2 Minimierung Rechenzeit

Für die neu verwendeten Peripherieeinheiten des Signalprozessors (Control Logic Accelerator, Floating Point Unit, Direct Memory Access) wurden Klassen im Level 1 Framework erstellt und umfangreich getestet. Insbesondere wurde die Prozessorbelastung dabei sehr gering gehalten, um eine hohe Systemperformance zu erreichen. Die Algorithmen im DSP wurden durch Nutzung von Tabellen so optimiert, dass auf rechenaufwändige Sinus/Kosinus-Berechnungen teilweise verzichtet werden kann, wodurch deutliche Reduzierungen der benötigten Rechenzeit resultierten.

2.7.3. AP7.3 Module-Test der Algorithmen in DSP-Regelung

Die Nutzung der GPE-EMV-Software, welche in MATLAB entwickelt wurde, ermöglichte es, den hartschaltenden Betrieb unter Verwendung der ARCP-Topologie simulativ zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die ARCP-Topologie die elektromagnetischen Störungen signifikant reduziert. Dies führt zu einer erheblichen Verringerung des notwendigen Filteraufwands.

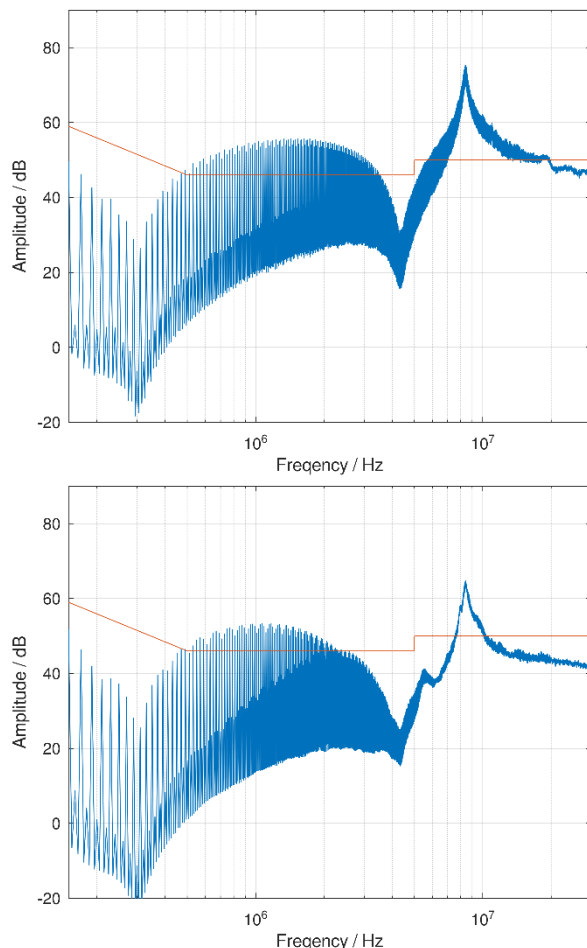


Abbildung 12: Berechnetes Spektrum (MW) auf Netzseite basierend auf emittiertem Spektrum und Filter-Modell aus AP6.1 bei Verwendung eines Netzfilters, (a): links: Hartschaltender Betrieb, (b): rechts: ARCP

2.8. Aufbau eines Batteriespeichersystems mit AFE und I-Filter

2.8.1. AP8.1 Entwicklung Treiber-Testschaltungen

Es wurden für alle notwendigen Bestandteile des Treibers bei ELSYS Testschaltungen Aufgrund der Liefersituation von integrierten Schaltungen musste speziell für die Stromversorgungsbaugruppen NXJ6 von Murata eine Alternative gefunden werden, da diese voraussichtlich erst im Jahr 2024 wieder lieferbar sind und bisher die einzige Stromversorgung mit einer ausreichenden Spannungsfestigkeit und akzeptabler Koppelkapazität zwischen Primär- und Sekundärseite war. Um eine brauchbare und auch kurzfristig lieferbare Alternative zu finden, wurden mehrere Übertrager und Schaltregler ICs getestet. Dabei wurden als Topologien der Push-Pull-Converter, der hart schaltende Halbbrückenwandler sowie der LLC getestet. Es hat sich gezeigt, dass mit Standard-Bauteilen, die kurzfristig verfügbar sind und nicht kundenspezifisch gefertigt werden müssen, nur ein Open-Loop-LLC, der mit dem IC UC25800 von TI und dem Übertrager 750319331 von Würth realisiert worden ist, hinsichtlich übertragbarer Leistung, Isolationsfähigkeit und Koppelkapazität in Frage kommt. Viele andere getestete Übertrager waren beispielsweise von der Durchschlagsspannung ausreichend geeignet, zeigten aber oberhalb von 900VRMS und 50Hz bereits Teilentladungseffekte, die für eine zuverlässige Betriebsweise nicht auftreten dürfen. Diese zusätzlich notwendigen Untersuchungen haben zu einem Mehraufwand von 1,5PM geführt.

Ein weiteres ursprünglich eingeplantes IC war das MAX10 FPGA von Intel, dessen Lieferzeit aktuell immer noch unklar ist. Als Alternative wurde das FPGA Trion vom Hersteller Efinix gefunden, für welches die für den Intel MAX10 bereits vorhandenen Aufsteck-Platinen neu entwickelt werden mussten (s. Abbildung 13). Bei der Entwicklung waren vor allem der später geringe, vorhandene Platz sowie die Störsicherheit entscheidende Faktoren, die ins Design des FPGA-Boards eingeflossen sind. Diese zusätzlich notwendigen Entwicklungsarbeiten haben ungefähr einen Mehraufwand von 2,0PM verursacht.

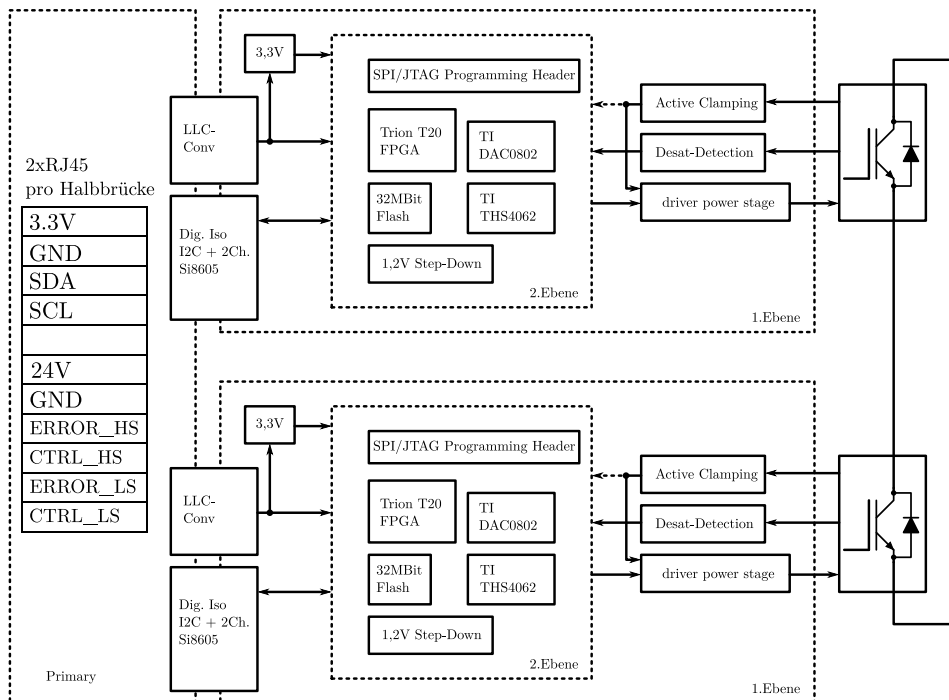


Abbildung 13: Treiber -Konzept iFilter

2.8.2. AP8.2 Entwicklung Treiber-Baugruppen

Die Erkenntnisse aus AP8.1 wurden mit dem Projektpartner GPE diskutiert, auf Basis derer GPE eine Treiber-Baugruppe entwickelt hat. Im Austausch fanden verschiedene Reviews schon Schaltplan und Layout statt.

Zur Ansteuerung der Leistungshalbleiter wurde eine online durch die Level1 parametrierbare Treiberplatine entwickelt. Diese Baugruppe ist in der Lage die Schaltgeschwindigkeit der Leistungshalbleiter durch wählbare Stromstufen zu variieren und so einen EMV-optimalen Betrieb einzustellen. Erreicht wird dies durch einen einstellbaren und im Betrieb veränderbaren Gate-Strom. Bei der Baugruppenentwicklung wurde auf eine hohe Präzision der Signale und eine hohe Störfestigkeit geachtet, da die Baugruppe im Betrieb direkt am Leistungsmodul angebracht wird und dort die hohen Spannungsänderungen (du/dt) stattfinden.

2.8.3. AP8.3 Test Treiber-Baugruppen

Bei ELSYS konnten auf einem geeigneten Prüfplatz mit den entwickelten Leiterplatten diverse Schaltexperimente basierend auf dem Doppelpulsschaltversuch durchgeführt werden.

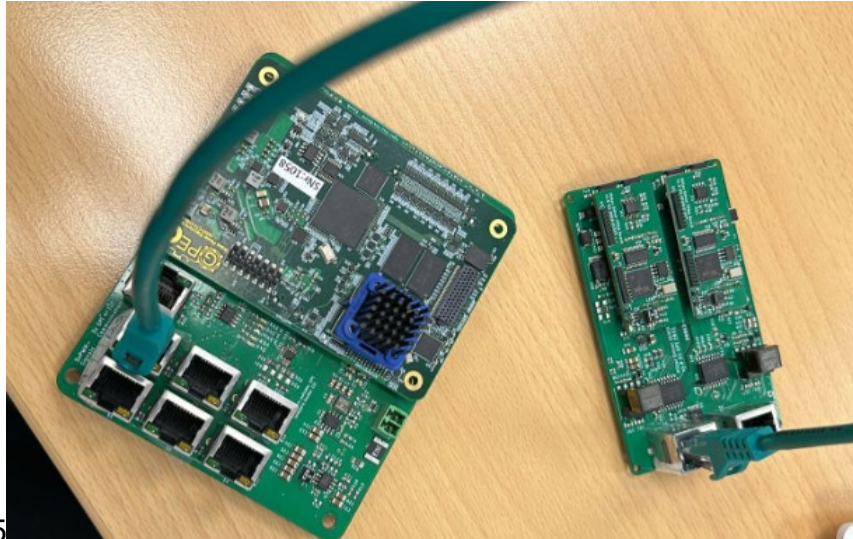


Abbildung 15

Abbildung 15 illustriert die auf dem Level 1 Controller installierte Kommunikations-Leiterplatte, die mit der IGBT-Treiberplatine verbunden ist.

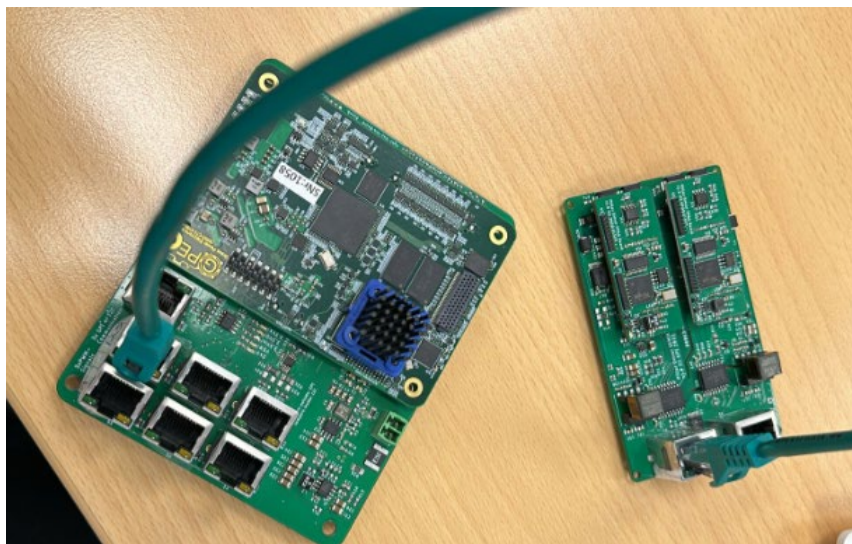


Abbildung 14: links: Leiterplatte mit C2000 DSP, rechts: Treiber-Platine iFilter

Die Ergebnisse dieser Experimente zeigten, dass das Einschaltverhalten von IGBTs durch den Einsatz von Spannungszwischenstufen positiv beeinflusst werden kann. Dies ist insbesondere bei niedrigen Strömen von großem Vorteil, da dadurch steile Spannungsflanken der Umrichter-Ausgangsspannung sowie parasitäre Oszillationen abgemildert werden können, wie in Abbildung 10 ersichtlich ist. Die Form von v_{ce} entspricht dabei einer zweifach endlich differenzierbaren S-Kurve im Frequenzbereich, die anstelle von 40 dB/Dekade eine Einhüllende von 60 dB/Dekade aufweist. Dies trägt zur signifikanten Reduktion der höherfrequenten Harmonischen im Megahertz-Bereich bei.

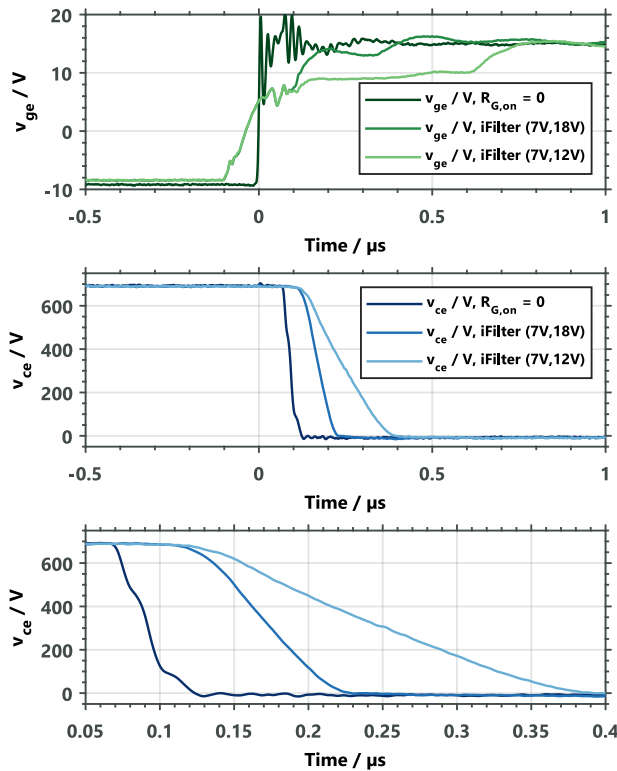


Abbildung 15: Schaltversuche mit iFilter-Treiber: Steuerung der Spannungssteilheit über Zwischenstufen der Gate-Emitter-Spannung

Das Versuchsaufbau ist in Abbildung 17 gezeigt. Mit Hilfe der beheizbaren Kupferplatte konnte das Schaltverhalten auch bei verschiedenen Halbleiter-Temperaturen untersucht werden.

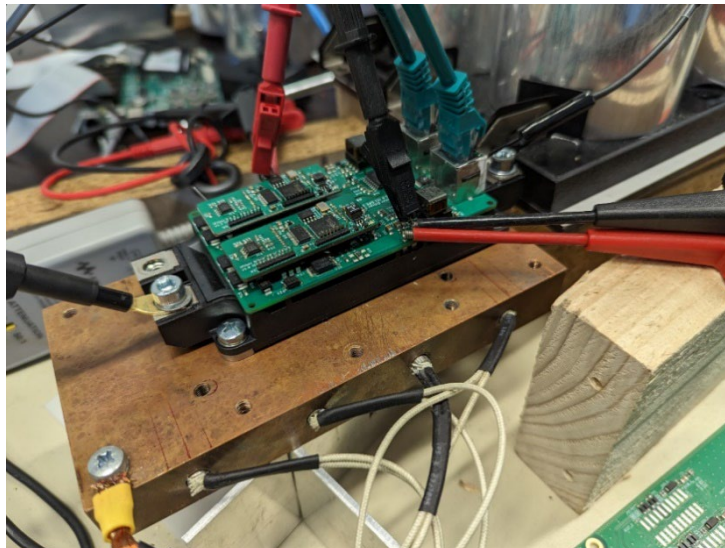


Abbildung 16: Schaltversuchs-Setup (Modul und iFilter-Treiber im Detail)

2.9. Test im Gesamtsystem

Der Test konnte mit einem bei GPE vorhandenen Stromrichter realisiert werden. Die Batterie wurde durch ein DC Netzteil ersetzt, da die Batterie keinen Einfluss auf das

EMV Verhalten auf der Netzseite hat.

2.9.1. 9.1 Verhalten in gesamtem Betriebsbereich

Der Versuchsaufbau war in der Lage, den vollen Betriebsbereich des Umrichters abzubilden. Der enthaltene 100 kW Stromrichter besteht aus zwei parallelen 50 kW Modulen. Mit den beiden 50 kW Modulen konnten auch vergleichende Messungen durchgeführt werden. Die Netzdrosseln und EMV Filter von den Projektpartnern LGF und HS Coburg konnten damit unter realen Betriebsbedingungen untersucht werden. Die Messungen wurden in 2025 in der verbleibenden Projektlaufzeit weitergeführt.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass bei geringen Leistungen die schnelleren Schaltvorgänge und bei höheren Leistungen maßgeblich die höhere Verlustleistung dominieren und entsprechenden Einfluss auf das EMV Verhalten haben.

2.9.2. Bewertung Messergebnisse

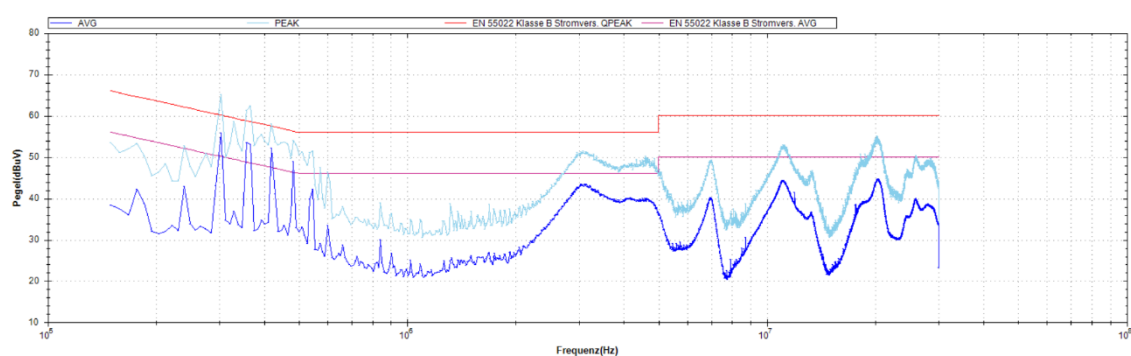


Abbildung 2.9-1: EMV-Messung des Blindleistungsstellers mit eingebauten Filtern

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die Arbeiten wurden zielgerichtet durchgeführt und zeigten die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Komponenten. Die eigentliche Produktentwicklung bzw. die Integration der Algorithmen in die Produkte und Anlagen ist nach Projektende durchzuführen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse werden schrittweise in die Anlagen eingeführt. Es wurden bereits Messungen an einer 300 kW Anlage durchgeführt, die deutlich verbessertes EMV-Verhalten zeigten. So kann beispielsweise auf geschirmte Leistungskabel verzichtet werden und die Montage vereinfacht sich erheblich. Für ungeschirmte Kabel können nun steckbare Leitungen eingesetzt werden. Die von Projektpartner LGF entwickelten Drosseln besitzen eine deutlich geringere Wicklungskapazität und übertragen deshalb deutlich geringere Störströme zu den EMV Filtern, die dann einfacher ausgelegt werden können. Wie sich im Projekt bestätigt hat, können die Schaltvorgänge von SiC MOSFETs sehr gut durch den Ansteuerstrom beeinflusst werden, deshalb eignet sich die Treiberelektronik sehr gut für diese Bauelemente. GPE beabsichtigt, die Umstellung von Si-IGBTs auf SiC-MOSFETs in absehbarer Zeit und hat mit der

adaptiven Treibertechologie hier einen wesentlichen Vorteil. Dabei wird ohnehin eine neue Treiberbaugruppe benötigt, in der dann die Ergebnisse aus dem Projekt integriert werden sollen.



Abbildung 2: EMV optimierte Drosseln in 300 kW Stromrichter- Anlage

4.1. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Es konnte durch Simulationsrechnung und anschließende Messungen ein wesentlich besseres Verständnis für die Ausbreitung und Filterung von elektromagnetischen Störungen gewonnen werden. Dadurch sind die Projektpartner in die Lage versetzt worden, diese Modelle auch für weitere Anwendungen anzupassen oder zu erweitern.

4.2. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Insbesondere der Übergang auf schnell schaltende Halbleitermaterialien, wie z.B. GaN oder SiC erfordern ein tieferes Verständnis für die Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Störungen, die durch die räumliche Anordnung und geeignete Verbindung der Schaltelemente optimiert werden kann. EMV Filter können dann gezielt zur Dämpfung noch vorhandener Störsignale dimensioniert und eingesetzt werden.

Derzeit ist eine Verschärfung und Erweiterung der relevanten Frequenzbereiche der EMV-Grenzwerte in den Normen angekündigt. Dadurch entsteht ein weiterer erheblicher Forschungsbedarf, um diese Anforderungen einhalten zu können.

KI-Technologien und die gewonnenen Erfahrungen sind eine Schlüsselkompetenz auch für weitergehende und umfangreiche Optimierungen des gesamten Systems (z.B. Batteriemodelle, Lademanagement, Lebensdaueroptimierung, Leistungsoptimierung) einsetzbar. Dadurch wird das System kontinuierlich leistungsfähiger und wettbewerbsfähiger.

5. Veröffentlichungen

5.1. Erfolgte, projektbezogene Veröffentlichungen

Zoher, M.; Grass, N.; Kennel, R.: DC link balancing of an Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter. EPE ECCE Europe 2023 Aalborg, Denmark

Zoher, M.; Grass, N.; Starost, V.: Hard- and soft-switching behavior of bipolar 1.2 kV gallium arsenide (GaAs) diodes in comparison to silicon and silicon carbide devices. ECCE Europe 2024 Darmstadt, Germany

Zoher, M.; Grass, N.; Kennel, R.: Efficiency Investigations of an Auxiliary Resonant Commutated Pole (ARCP) Inverter. PCIM Europe 2024 Nürnberg, Germany

5.2. Geplante, projektbezogene Veröffentlichungen

In 2026 findet in Nürnberg die internationale IEEE Konferenz intelec statt, die sich mit Stromversorgungen für kritische Infrastruktur beschäftigt. Diese Konferenz wird lokal von Prof. Graß als Conference Chair organisiert und bietet die Möglichkeit, die Projektergebnisse vorzustellen und mit internationalen Forschern und Spezialisten zu diskutieren.

GPE plant, jeweils zur Markteinführung der im Projekt entwickelten Komponenten wissenschaftlich technische Veröffentlichungen durchzuführen.