

BEWILLIGUNGSEMPFÄNGER



Abschlussbericht zum Förderprojekt

Hocheffizientes Industriernetzteil – Überführung neuer Halbleitertechnologien in die industrielle Praxis

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 34293/01-21/2,
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verfasser: Ralf Wörner, Mirko Brenneisen

Baden-Baden, im September 2020

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	34293/01	Referat	21/2	Fördersumme	220.000 €
Antragstitel		Hocheffizientes Industriernetzteil – Überführung neuer Halbleitertechnologien in die industrielle Praxis			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	30.04.2018				
Zwischenberichte	31.12.2018	31.12.2019			
Bewilligungsempfänger				Tel 07221 50436-0	
GO Engineering Gesellschaft zur Entwicklung von Hard-und Software mbH Stolzenbergstr. 13/4 76492 Baden-Baden				Fax 07221 50436-36	
				Projektleitung M. Brenneisen, R. Wörner	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner					
 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens Die technologische Entwicklung industrieller Netzteile ist an einem Punkt angelangt, an dem physikalische Grenzen des Halbleitermaterials Silizium erreicht werden. Insbesondere die Drift-Geschwindigkeit der Elektroden im Halbleiter sowie die Lage und die Größe der Bandlücke im Halbleitermaterial verhindern eine weitere Steigerung der Energieeffizienz. Ziel des Projekts ist daher die Entwicklung eines neuartigen, hocheffizienten Netzteils auf der Basis neuartiger Halbleitermaterialien. Dabei werden Ergebnisse im Bereich der Grundlagenforschung insbesondere in Bezug auf Gallium-Nitrid aus dem Labor und exemplarischen Prototyp- Anwendungen in Produkte überführt, die höchsten industriellen Anforderungen in Bezug auf Lebensdauer, Ausfallsicherheit und Energieeffizienz genügen. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden Um diese neuartigen Halbleitertechnologien optimal in die industrielle Anwendung zu überführen, müssen neue Entwicklungsparadigmen zur Planung und Realisierung von Schaltungen umgesetzt werden. Dies umfasst die Optimierung des vollständigen Schaltungslayouts im Hinblick auf die Minimierung von Leitungslängen und Abschirmung spezieller Komponenten, die Entwicklung hochspezialisierter Ansteuerungsschaltungen, die Entwicklung neuer Regler-Software mit der Integration spezialisierter Sensorik sowie ein integriertes Thermo- Konzept mit Berücksichtigung sämtlicher Teilkomponenten der Elektronik.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projekts wurde ein innovatives und hocheffizientes Industrienetzteil auf Basis neuartiger GaN-Leistungstransistoren realisiert.

In einem experimentellen Entwicklungsprozess wurde zunächst ein Labormuster erarbeitet. Begleitet durch umfangreiche Labormessungen konnte dann ein Thermomanagement-Konzept mit spezieller Entwärmungsstrategie für hochbelastete Spulenelemente sowie ein hochkompaktes und doch EMV-stabiles Schaltungslayout erarbeitet werden. Im Zuge der Weiterentwicklung zur Serienreife wird dieses Schaltungslayout nun in eine dreidimensionale Anordnung der Komponenten zur physischen Trennung von Signal- und Leistungspfaden überführt werden.

Auch die Herausforderungen im Bereich der Regelungstechnik konnten durch die Realisierung eines PI-Reglers mit definierter Auframpung sowie eine separate Frequenzregelung der Eingangsspannung gemeistert werden.

Im Ergebnis entsteht ein äußerst vielversprechender Demonstrator eines hocheffizienten und hochkompakten Netzteils, der nun in die Serienreife überführt wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das neue System wird im Rahmen von Messen sowie durch die gezielte Platzierung von Publikationen in geeigneten Medien und Fachzeitschriften präsentiert werden. Darüber hinaus ist die offizielle Markteinführung noch in diesem Jahr geplant, wodurch das neue System ebenfalls in der Öffentlichkeit platziert werden kann.

Fazit

Im Projekt konnte das ehrgeizige Ziel der Realisierung eines ultrakompakten und hocheffizienten Industrienetzteils erreicht werden.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden große Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Bauteil-Stabilität, Störeinflüsse in der (Eingangs-) Netzspannung sowie im Hinblick auf die EMV-Stabilität erfolgreich gemeistert werden.

Im Ergebnis konnte ein Demonstrator realisiert werden, der im Zuge der Weiterentwicklung bis zur Serienreife einer erneuten Iteration des Schaltungslayouts unterzogen werden wird. Dabei wird das im Bericht bereits dargestellte Konzept zur räumlichen Anordnung der Komponenten umgesetzt werden, um auch das Ziel der äußerst kompakten Ausmaße des Systems vollständig zu erreichen.

Insgesamt konnten die im Antrag dargestellten Projektziele erreicht werden. Auch die skizzierten Effekte auf das Unternehmen sowie im Hinblick auf die Energieeffizienz und das Energie-Einsparpotential erscheinen auch nach Projektabschluss noch realistisch: Die Markteinführung unseres Systems ist noch für dieses Jahr geplant. Das neue Netzteil wird zur Markteinführung den Stand der Technik mindestens mitbestimmen, wenn nicht sogar neu definieren.

Inhaltsverzeichnis

PROJEKTKENNBLETT	1
1. ZUSAMMENFASSUNG	5
2. EINLEITUNG	6
3. ENTWICKLUNGSARBEITEN UND ERREICHTE ERGEBNISSE	9
Ablauf der Entwicklungsarbeiten insgesamt	9
Realisierung der passiven Bauteile sowie des Thermomanagements	10
Platinen- und Schaltungslayout	11
Reglerentwicklung	12
4. FAZIT	17

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Funktionsmuster des Netzteils, bestehend aus LLC und PFC auf Kühlerplatte. Pfeil: Konnektierung der Hochspannungslitze auf die Kühlplatte zur Entwärmung der Spule	11
Abbildung 2: Darstellung des Signal(blau). und des Leistungspfads (rot) im realisierten Prototyp. Zur Separierung muss die Grundfläche vergrößert oder ein dreidimensionales Schaltungslayout realisiert werden.	12
Abbildung 3: Funktionsprinzip des analytischen Reglermodells.....	13
Abbildung 4: Blockschaltbild der Nulldurchgangserkennung.....	14

1. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein innovatives und hocheffizientes Industrienetzteil auf Basis neuartiger GaN-Leistungstransistoren realisiert.

In einem experimentellen Entwicklungsprozess wurde zunächst ein Labormuster erarbeitet. Begleitet durch umfangreiche Labormessungen konnte dann ein Thermomanagement-Konzept mit spezieller Entwärmungsstrategie für hochbelastete Spulenelemente sowie ein hochkompaktes und doch EMV-stabiles Schaltungslayout erarbeitet werden. Im Zuge der Weiterentwicklung zur Serienreife wird dieses Schaltungslayout nun in eine dreidimensionale Anordnung der Komponenten zur physischen Trennung von Signal- und Leistungspfaden überführt werden.

Auch die Herausforderungen im Bereich der Regelungstechnik konnten durch die Realisierung eines PI-Reglers mit definierter Auframpung sowie eine separate Frequenzregelung der Eingangsspannung gemeistert werden.

Im Ergebnis entsteht ein äußerst vielversprechender Demonstrator eines hocheffizienten und hochkompakten Netzteils, der nun in die Serienreife überführt wird. Die angestrebte hohe Effizienz über einen sehr breiten Lastbereich konnte bereits in Simulationen demonstriert werden.

2. Einleitung

Das Unternehmen Go Engineering GmbH ist spezialisiert auf die Entwicklung elektronischer Schaltungen – insbesondere im Bereich der Leistungselektronik. Das Schwesterunternehmen Merkur GmbH ist ein Elektronikfertigungs- Unternehmen, welches für Kunden die vollständige Fertigungskette von der automatischen und manuellen Platinenbestückung, das Löten, den automatisierten Test der Platinen bis hin zur Lackierung, der Verpackung und dem Versand der gefertigten Elektronik abbildet. Dies versetzt die Unternehmensgruppe in die Lage, Elektronische Bauteile von der Entwicklung bis hin zur Großserienfertigung ganz individuell an die Bedürfnisse des Kunden anzupassen.

Beide Unternehmen sind in einem Gebäude vereint und können so Synergie- Effekte sowohl in Bezug auf das in der Unternehmensgruppe vorhandene Know-How als auch in Bezug auf die Infrastruktur optimal nutzen.

Einen wesentlichen Anteil am Umsatz der Unternehmen hat die kundenspezifische Entwicklung und Fertigung von industriellen Schaltnetzteilen, wie für Bohrmaschinen, Hochleistungs-Spülmaschinen (z. B. auf Kreuzfahrtschiffen und in der Großgastronomie), Strickmaschinen und anderen Industriemaschinen sowie für Schaltschränke und Industrie- PCs. Im Gegensatz zu Netzteilen mit ähnlicher Leistung, die in für Privatkunden bestimmte Geräte integriert werden, müssen solche Industrienetzteile höchsten Ansprüchen an die Lebensdauer (> 10 Jahre), die Ausfallsicherheit (z. B. in Bezug auf die Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit und den umgebenden Luftdruck) und die Energieeffizienz genügen.

Die technologische Entwicklung solcher industrielleren Netzteile ist jedoch an einem Punkt angelangt, an dem physikalische Grenzen des Halbleitersmaterials Silizium erreicht werden. Insbesondere die Drift-Geschwindigkeit der Elektroden im Halbleiter sowie die Lage und die Größe der Bandlücke im Halbleitersmaterial verhindern eine weitere Steigerung der Energieeffizienz!

Diese technologisch-physikalische Grenze kann überwunden werden, wenn Forschungsergebnisse im Bereich neuer Halbleitertechnologien wie insbesondere in Bezug auf Galliumnitrid (GaN) von Labor und exemplarischen Prototyp- Anwendungen auf Messeständen in Produkte überführt werden, die im industriellen Umfeld höchsten Ansprüchen in Bezug auf Zuverlässigkeit genügen. Im Bereich der Hochfrequenztechnik wie beispielsweise im Bereich der Mobilfunkübertragung, aber auch in anderen Bereichen der Hochfrequenztechnik wie der HF- Bildgebung oder im Bereich der Grundlagenforschung werden schon seit längerem Transistoren und andere Halbleiter- Bauelemente auf Basis der Halbleitersmaterialien Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) verwendet. Im Vergleich dieser beiden neuen Materialien zeichnet sich GaN durch im Vergleich höhere Bandlücken und Elektronendrift- Geschwindigkeiten aus.

Außerdem können Halbleiterelemente auf der Basis von GaN auf Si- Wafern produziert werden und damit steht die etablierte Prozesstechnologie in den Fabs zur Verfügung.

Für die Verwendung solcher Bauteile im Bereich der Leistungselektronik mussten und müssen jedoch hohe technologische Hürden überwunden werden. Dabei sind konkret die unterschiedliche Schaltungscharakteristik sowie die im Vergleich zu Silizium wesentlich geringere Durchschlagfestigkeit gegenüber hohen Strömen und Spannungen zu nennen. Diese Eigenschaften begrenzten bis vor Kurzen beispielsweise die Stromfestigkeit handelsüblicher GaN- Transistoren auf ca. 200mA. Im Bereich der Leistungselektronik muss jedoch eine Stromfestigkeit bis zu 25A und mehr – also um das Hundertfache höher – realisiert werden.

Diese Hürden wurden in den letzten Jahren vor Projektbeginn durch intensive Bemühungen im Bereich der Grundlagenforschung überwunden. Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützte diese Bemühungen mit insgesamt drei Projekten (Laufzeit bis 2019) mit dem Fokus auf Bauteilentwicklung, Erforschung der Skalierbarkeit der Technologie sowie der Erforschung von grundlegenden Schaltungskonzepten für spezifische Anwendungsbereiche.

Diese Grundlagenforschungsprojekte legen damit die Grundlage für die Übertragung der neuen Technologie in Anwendungsbereichen, für deren Erschließung hohe technologische Hürden überwunden werden müssen und eröffnen die Möglichkeit zur Erforschung von Schaltungskonzepten, die eine weitere Effizienzsteigerung von Schaltungen auf der Basis neuer Halbleiter ermöglichen.

Diese Erwartungen werden auch durch Demonstratorschaltungen, wie sie beispielsweise im Rahmen eines Wettbewerbs der Firma Google zu besonders kompakten Netzteilen entwickelt wurden, gefördert. Allerdings sind die auf Messen gezeigten Schaltungen auch heute noch ausschließlich Prototypen, die die hohen Anforderungen an Industrieprodukte nicht erfüllen: Im Inneren der Netzteile kommt es aufgrund der im Schaltungslayout geforderten äußerst kurzen Leitungslängen zu Spannungsüberschlägen und Kurzschlüssen, die die Lebensdauer auf wenige Betriebsstunden limitieren und die Betriebssicherheit der Schaltung in tatsächlicher Anwendung grundsätzlich negieren.

Große Netzteilhersteller zögerten die Umsetzung von Projekten zur Entwicklung solcher in industrieller Praxis anwendbarer Netzteile hinaus, weil zu Projektstart – und auch bis heute – noch keine Software- und Elektronikmodule für die Ansteuerung der Transistoren verfügbar sind. Daraus resultiert bis heute ein hoher Entwicklungsaufwand, der angesichts der bei diesen Herstellern immer noch hervorragenden Nachfrage nach konventionellen Netzteilen nicht rentabel erscheint. Hersteller von Standardmodulen für die Ansteuerung der Transistoren wieder-

rum zögern ihre Entwicklungen hinaus, bis große Hersteller ihr Interesse in die Abnahme solcher Bausteine durch die eigene Entwicklung von Leistungselektroniken auf der Basis von GaN- Bausteinen dokumentieren.

Aus der Tatsache, dass sowohl große Hersteller von Schaltnetzteilen als auch die Entwickler von Standard-Modulen für die Ansteuerung (sowohl in Bezug auf Hard- als auch auf Software) jeweils gegenseitig auf einseitige Bemühung zur Entwicklung einer Leistungselektronik basierend auf GaN- Transistoren warten, resultiert eine potentiell hervorragende Marktposition für ein Unternehmen, welches als erstes dazu in der Lage ist, ein besonders effizientes Schaltnetzteil auf der Basis von Galliumnitrid am Markt zu platzieren.

Die neuen Halbleitertechnologien erfordern jedoch in einigen zentralen Punkten neue Entwicklungsparadigmen zur optimalen Planung und Realisierung von Schaltungen. Es genügt nicht, einige Bauteilgruppen eines Schaltungsnetzteils durch Schaltungen auf der Basis von GaN zu ersetzen. Wird nicht das komplette Layout des Netzteils mit allen schaltungstechnischen passiven und aktiven Komponenten konsequent auf die neue Halbleitertechnologie ausgelegt, kommt es in nicht-optimierten Ansteuerungsschaltungen und über parasitäre Effekte zu Effizienzverlusten und Regelungsfehlern, die die Lebensdauer der Systeme begrenzen und die erhofften Effizienzgewinne zu Nichte machen.

Das Ziel dieses Projekts war es, durch die Entwicklung eines speziell auf neue Halbleitertechnologien abgestimmten industriellen Schaltnetzteils mit der dafür notwendigen Regelungstheorie eine Brücke von der Grundlagenforschung im Labor hin zur industriellen Anwendung zu schlagen. Dazu wurden sämtliche Teilkomponenten des Netzteils speziell im Hinblick auf die Anforderungen der neuen Halbleitertechnologien entwickelt und neue Paradigmen zur Integration und Ansteuerung der Komponenten erforscht. Dies ermöglicht nun

- Massive Energieeinsparungen durch die Steigerung der Energieeffizienz
- Ressourceneinsparungen durch Größenreduktion bei passiven Bauteilen und Kühlkörpern
- Firmenwachstum und Zukunftsfähigkeit durch Schaffung eines Alleinstellungsmerkmals für die eigenen Produkte

Nach ersten Abschätzungen können bei der Etablierung dieser neuen Technologie bereits kurzfristig große Energie- und Ressourceneinsparungen realisiert werden. Das Unternehmen Go Engineering setzt heute ca. 20.000 Schaltnetzteile pro Jahr um. Nach der Realisierung des Projekts plant das Unternehmen, die Produktion innerhalb der nächsten 5 Jahre auf 250.000 Schaltnetzteilen pro Jahr zu steigern. Allein bei der Fa. Go Engineering können dadurch in den nächsten 5 Jahren ca. 500.000 Netzteile in den Markt eingeführt werden. Davon unberührt bleiben weitere Einsparungen durch die Adaption der Technik durch im Vergleich wesentlich

größere Hersteller von Netzteilen. Auf der Basis verfügbarer Marktzahlen¹ lässt sich der Gesamtmarkt im Jahr 2017 auf ein Umsatzvolumen von ca. 480 Mio. Euro in Europa im Bereich industrieller Netzteile abschätzen. Dies entspricht dem Absatz von konservativ geschätzt ca. 8 Mio. Netzteilen.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

Ablauf der Entwicklungsarbeiten insgesamt

Die Projektarbeiten wurden im Rahmen einer klassischen experimentellen Entwicklungsstrategie durchgeführt. Dementsprechend wurde im Projekt zunächst ein Demonstratorsystem der LLC-Schaltung entworfen und als Labormuster zu einem ersten Demonstrator eines Netzteils kombiniert. Anhand dieses Demonstrators wurden dann umfangreiche Messungen im Hinblick auf Schaltcharakteristika, EMV-Eigenschaften des Systems sowie im Hinblick auf entsprechende Leistungseigenschaften und das Wärmemanagement ausgeführt.

Basierend auf diesen ersten Messungen wurde dann auch eine Regelungsstrategie entwickelt. Erste Untersuchungen zeigten, dass die Regelung der LLC-Schaltung mit dynamischer Last die Realisierung eines Reglers vierter Ordnung erfordert. Dementsprechend wurde zunächst ein analytisches Reglermodell entwickelt und dann im Anschluss mittels geeigneter Diskretisierungsansätze in ein für die Implementierung auf den μ Controllern des späteren Netzteils geeignetes Modell überführt und implementiert.

Das resultierende System aus Schaltungs-Demonstrator sowie Regler wurde dann erneut umfangreichen Messungen unterzogen und systematisch im Hinblick auf Thermomanagement, EMV-Verträglichkeit und Signalstabilität hin überarbeitet.

Erneute umfangreiche Labormessungen zeigten dann, dass sich die für eine Anwendung in der industriellen Praxis zwingend notwendige Stabilität und Robustheit nur umsetzen lässt, wenn Signal- und Leistungspfade grundsätzlich separiert werden. Dafür wurde in einem erneuten Re-Design ein Ansatz mit deutlich größerer Grundfläche gewählt, um die Auslegung des Prototyps auch in Langzeitmessungen validieren zu können.

Im Zuge der Weiterentwicklung dieses Prototyps bis zur Serienreife muss nun ein erneutes Redesign erfolgen, bei dem das Schaltungslayout durch eine geschickte Platzierung einzelner

¹ Vergl. Porträt Fa. PULS – Marktführer auf dem Gebiet von Schaltzetteilen, <http://www.k-magazin.de/index.cfm?pid=1436&pk=102859#.Wi5Jh1XiaUk>; Unternehmensportrait mit aktuellen Absatzzahlen; „Innovativ wie immer“ - Polyscope Magazin, Ausgabe 18/2017; S. 34-35

Komponenten im umbauten Raum des Steuerungsgeräts sowie die dreidimensionale Ineinanderschichtung bisher nebeneinander angeordneter Komponenten erneut verkleinert werden kann.

Besondere Herausforderungen in den Entwicklungsarbeiten ergaben sich insbesondere durch unerwartet starke Störeinflüsse der Netzspannung, die die Funktion der PFC sowie des kompletten Netzteils negativ beeinflussten. Hier musste eine zusätzliche Frequenzregelung im Steuerungssystem integriert werden, um Jitter zu eliminieren.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die verwendeten GaN- Bausteine ebenfalls noch nicht die für einen Einsatz im angestrebten Layout notwendige Robustheit und Langzeitstabilität aufwiesen. Es handelte sich hier um sogenannte „Engineering Samples“, die zwar offiziell den mit dem Hersteller abgesprochenen Spezifikationen entsprachen, beim Einsatz im hier geforderten Leistungsbereich jedoch Oxidationseffekte auftraten, die dann zur Fehlfunktion des Netzteils führten. Als Abhilfe wurde die Schaltungstopologie geändert, wodurch die Stabilität nun gewährleistet werden kann.

Realisierung der passiven Bauteile sowie des Thermomanagements

Für die stabile Realisierung des Netzteils wesentlich ist insbesondere die Auslegung der LLC-Spule sowie die Realisierung eines Thermomanagement-Konzepts zur effizienten Ableitung der Wärme aus dem Gehäuse hinaus. Aufgrund der sehr dichten Packung innerhalb des Gehäuses ist die Umströmung der Komponenten dabei vergleichsweise gering.

Im Ergebnis wurde in Kooperation mit einem spanischen Spulenhersteller eine Spule aus Hochspannungslitze auf einem Eisenkern mit spezieller Geometrie und einem Hüllschuh realisiert.

Um die Entwärmung der Spule zu gewährleisten, sind die Litzen als Wärmeableiter direkt über sogenannte Entwärmungs-Pins (Vergl. Pfeil auf Abb. 1) mit der Platine verbunden und bis zur darunterliegenden Kühlplatte konnektiert.

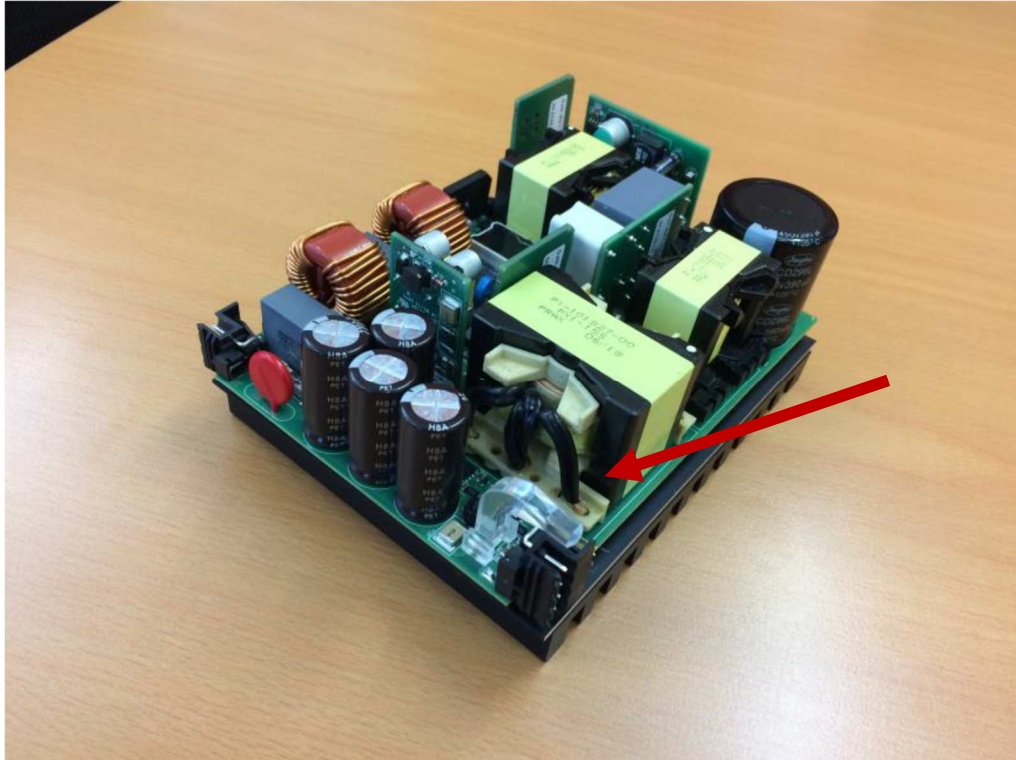


Abbildung 1: Funktionsmuster des Netzteils, bestehend aus LLC und PFC auf Kühlerplatte. Pfeil: Konnektierung der Hochspannungslitze auf die Kühlerplatte zur Entwärmung der Spule

Platinen- und Schaltungslayout

Die große Herausforderung im Bereich des Platinen- und Schaltungslayouts war es, einerseits äußerst kurze Signalpfade zu realisieren, die die stabile Regelung mit der notwendigen Regelfrequenz erfordert; dabei aber andererseits die Signalpfade der Schaltung von den Leistungspfaden zu separieren.

Dafür wurde bei den ersten Prototypen ein Ansatz mit Aufsteckplatinen gewählt, auf denen die jeweiligen Controller-Schaltungen integriert wurden. Obwohl dadurch zumindest die Controller selbst physisch von den an der Unterseite des Netzteils verlaufenden Leistungspfaden separiert werden konnten, führte dieser Ansatz im Ergebnis nicht zur erforderlichen EMV-Stabilität des Netzteils.

Dementsprechend musste das Schaltungslayout dann ein weiteres Mal überarbeitet werden. Das Ergebnis ist als Entwurf dargestellt in Abbildung 2: Signalpfad (blau) und Leistungspfad (rot) überschneiden sich zwangsläufig, können jedoch durch eine Entzerrung der Komponenten

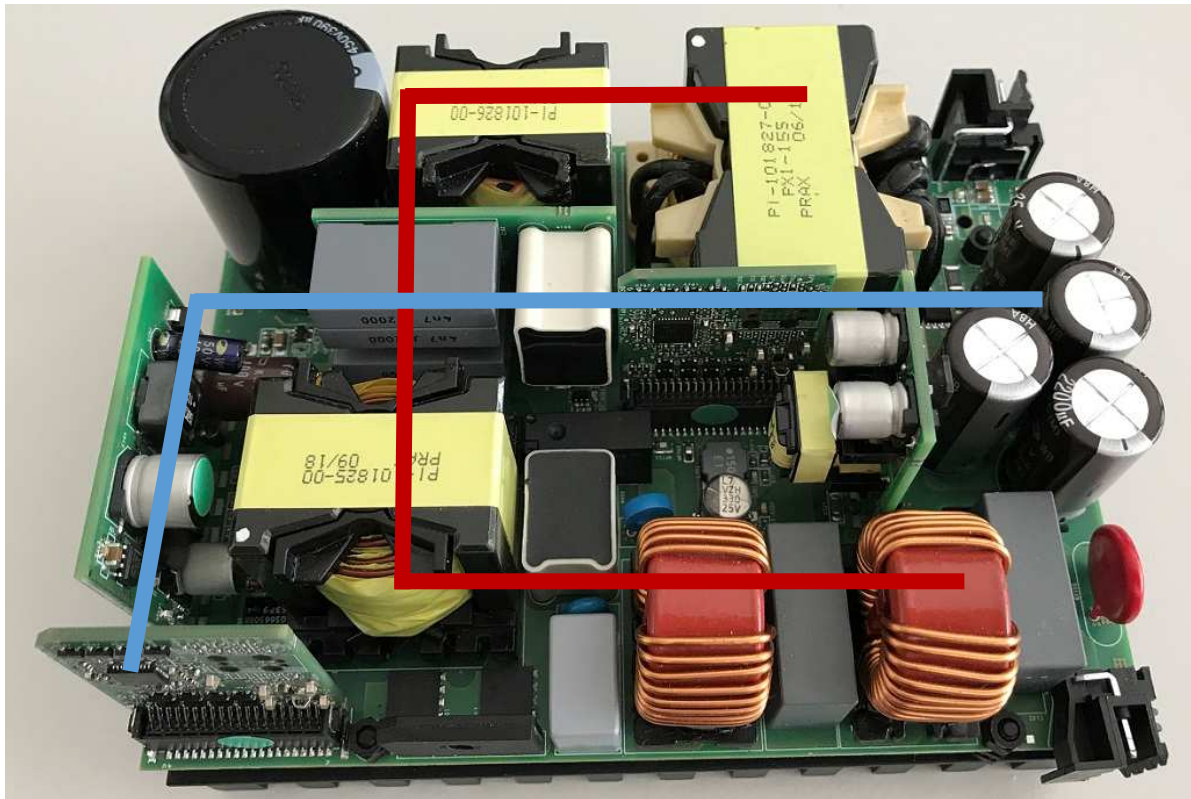


Abbildung 2: Darstellung des Signal(blau). und des Leistungspfad (rot) im realisierten Prototyp. Zur Separierung muss die Grundfläche vergrößert oder ein dreidimensionales Schaltungslayout realisiert werden.

Im Zuge der Weiterentwicklung des Systems zur Serienreife wird ein weiteres Redesign des Schaltungslayouts erfolgen. Dafür werden die einzelnen Baugruppen nicht auf einer Platine zusammengeführt, sondern auf separaten Platinen realisiert, die dann Hufeisenförmig ineinander verschränkt werden können. Dies ermöglicht es, *sowohl* den nötigen Abstand zwischen Signal- und Leistungspfad einzuhalten, *als auch* den angestrebten Bauraum erreichen zu können.

Reglerentwicklung

Die Regelung wird im Rahmen des Projekts als PI-Regler vierter Ordnung mit einer speziell parametrisierten Stromrampe realisiert. Das Funktionsprinzip dieses analytischen Reglermodells ist in Abb. 3 dargestellt. Zwei zunächst separate Regelschleifen für Strom und Spannung werden über die Regelfaktoren I-Anteil und p-Anteil miteinander verbunden.

Nachdem die grundlegende Regelung des Schaltnetzteils sehr erfolgreich umgesetzt werden konnte, ergaben sich bei der Implementierung des Systems auf der Zielhardware große Herausforderungen im Hinblick auf die Identifikation des Nulldurchgangs der Halbwelle der Netzspannung, sowohl für das Totem-Pole-PFC-Element als auch für das LLC-System.

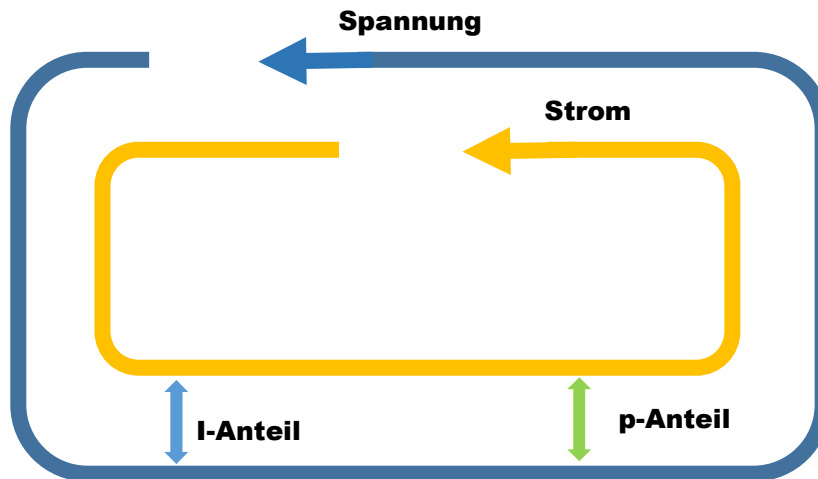


Abbildung 3: Funktionsprinzip des analytischen Reglermodells

Um die notwendige Stabilität zu gewährleisten musste daher eine separate Frequenzregelung auf der Steuerplatine implementiert werden. Dies ermöglicht es, den Wechsel der Netzhälfte präzise zu verfolgen und Jitter – leichte Schwankungen im Netztakt, die dann zu einer fehlerhaften Umsteuerung der entsprechenden Systeme führen – zu vermeiden.

Die Nulldurchgangserkennung, die Totem-Pole-PFC und die LLC sind ein in Reihe geschaltetes Reglersystem. Das heißt, die LLC Regelung reagiert auf das Totem-Pole Ausgangssignal. Die Totem-Pole-PFC reagiert und regelt auf die entsprechende Halbwelle. Suggestiert die Nulldurchgangserkennung eine falsche Halbwelle der Totem-Pole-PFC, etwa durch eine Netzstörung (Burst oder Surge-Störsignal) regelt die Totem-Pole in der falschen Halbwelle. Es kommt zum Ausfall.

Um dies nun zu vermeiden, muss die Nulldurchgangserkennung ebenso intelligent geregelt und alle Netz-Störungen abgefangen werden. Eine digitale PLL (Phase Locked Loop) bildet dabei die Grundlage der Nulldurchgangserkennung. Sie regelt die anliegende Netzfrequenz. Hierbei werden Frequenzschwankungen und Abweichungen immer mit der folgenden Halbwelle ausgeregelt und nachgeführt.

Der PFC-Controller synchronisiert und vergleicht mit Hilfe einer Referenz-Sinuswelle, die tatsächlich anliegenden Netz-Sinus-Halbwelle. Die Frequenzabweichung bildet die Regeldifferenz mit der das Nulldurchgangs-Fenster in der folgenden Halbwelle nachgeführt wird. Bei massive Netz-Störungen wie Burst und Surge werden diese erkannt und die Totem-Pole-PFC über eine oder mehrere Halbwellen sofort ausgeschaltet, bis die Störung vorüber ist. Danach schaltet sich die Totem-Pole-PFC wieder zu und regelt wieder auf dem Netzsignal. Das Blockschaltbild der intelligenten Nulldurchgangserkennung zeigt Abbildung 4.

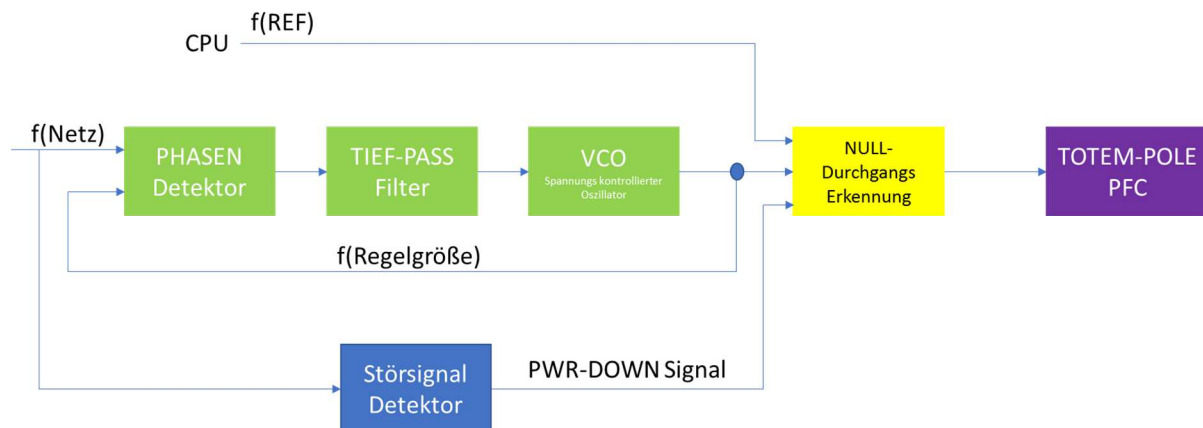


Abbildung 4: Blockschaltbild der Nulldurchgangserkennung

Effizienzmessung

Um die Projektergebnisse zu quantifizieren, wurden an mehreren Labormustern Effizienzmessungen durchgeführt. Dafür wurden jeweils bei unterschiedlichen Lastströmen jeweils Eingangs- und Ausgangs-Last berechnet und daraus die entsprechende Effizienz berechnet. Die Ergebnisse dieser Rechnungen finden sich in den Tabellen 3.1 bis 3.3.

Die großen Herausforderungen in Bezug auf die EMV-Verträglichkeit sowie das Schaltungslayout erfordern ein weiteres Redesign der Schaltung. Um die Auswirkungen dieser voraussichtlich im Jahr 2021 abgeschlossenen Arbeiten bewerten zu können, wurde die resultierende Schaltung in Simulationsrechnungen einbezogen. Hier konnten die in Tab. 3.4 dargestellten Werte ermittelt werden.

Wie in Abb. X dargestellt, kann durch das Redesign des Netzteils eine wesentlich konstantere Effizienzkurve erreicht werden, als das für die bislang realisierten Labormuster der Fall war. Zum Vergleich: Der durchschnittliche Wirkungsgrad eines konventionellen Netzteils schwankt stark mit der Last und liegt typischer Weise im Durchschnitt zwischen 85 % und knapp über 90%.

Tabelle 3.1: Effizienzmessung, Nominelle Ausgangsspannung 370V V_{out}

Strom [A]	Pin [W]	Pout [W]	Eff. [%]	I_{prim}	I_{sek1}	I_{sek2}	FRQ[kHz]
0	7,4	0	0	1,275	0	0	338
1	31	23,95	0,772580645	1,3	0,8	1,6	336
5	128	119,75	0,935546875	1,54	3,4	6,8	328
10	250	239,5	0,958	2,1	6,6	13,2	319
15	378	359,25	0,950396825	2,8	10,4	20,8	310
20	505	479	0,948514851	3,5	13,7	27,4	304
22	557	526,9	0,945960503	3,9	15	30	301

Tabelle 3.2: Effizienzmessung: Nominelle Ausgangsspannung 380V V_{out}

Strom [A]	Pin [W]	Pout [W]	Eff. [%]	I_prim	I_ sek1	I_ sek2	FRQ[kHz]
0	7,6	0	0	1,15	0	0	368
1	31,6	23,95	0,757911392	1,19	0,7	1,4	362
5	128,8	119,75	0,929736025	1,45	3,06	6,12	352
10	252	239,5	0,950396825	2,04	6,7	13,4	335
15	379	359,25	0,947889182	2,8	10,3	20,6	321
20	506	479	0,946640316	3,55	13,5	27	312
22	558	526,9	0,944265233	3,8	15,06	30,12	310

Tabelle 3.3: Effizienzmessung. Nominelle Ausgangsspannung 390V V_{out}

Strom [A]	Pin [W]	Pout [W]	Eff. [%]	I_prim	I_ sek1	I_ sek2	FRQ[kHz]
0	2,8	0	0			0	
1	40	23,94	0,5985			0	382-435
5	128,7	119,7	0,93006993	1,35	3,5	7	379
10	252	239,4	0,95	2,04	6,56	13,12	350
15	380	359,1	0,945	2,8	10,1	20,2	332
20	507	478,8	0,944378698	3,55	13,4	26,8	322
22	558	526,68	0,943870968	3,8	15	30	319

Tabelle 3.4: Simulation – Effizienzmessung nach Redesign, Nominelle Ausgangsspannung 390V V_{out}

Strom [A]	Pin [W]	Pout [W]	Eff. [%]	I_prim	I_ sek1	I_ sek2	FRQ[kHz]
0	2,8	0	0			0	
1	30	24	0,8			0	382-435
5	128	122	0,953125	1,35	3,5	7	379
10	252	243	0,964285714	2,04	6,56	13,12	350
15	380	370	0,973684211	2,8	10,1	20,2	332
20	507	496	0,978303748	3,55	13,4	26,8	322
22	558	542	0,971326165	3,8	15	30	319

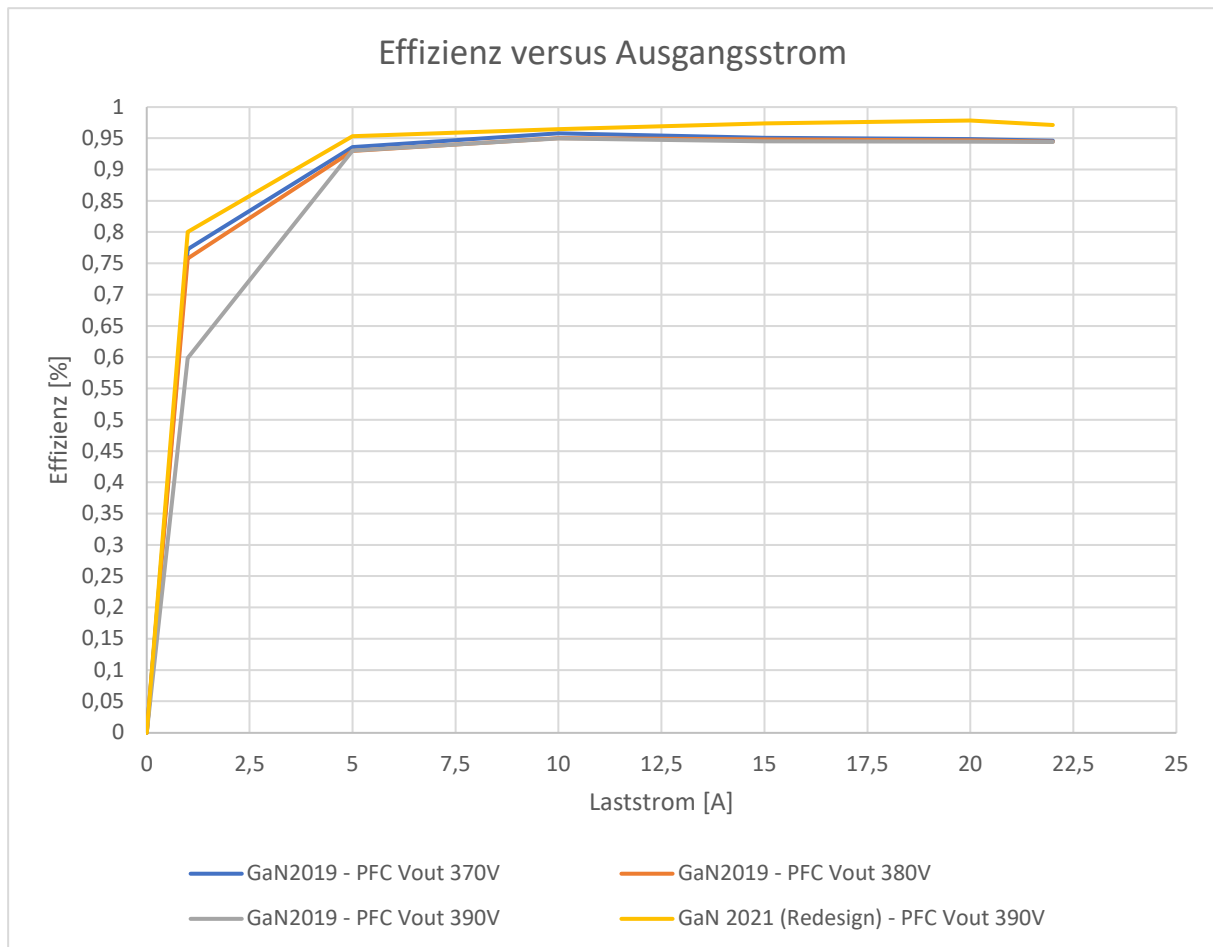


Abbildung 5: grafische Darstellung der Effizienzkurven – durch das Redesign kann die Effizienz des Systems speziell im Hochlastbereich noch einmal deutlich erhöht werden.

Ökonomische Bewertung

Durch das erforderliche komplette Redesign des Schaltungslayouts verzögert sich die Markteinführung unseres Systems bis Ende 2021/Anfang 2022. Nichtsdestotrotz sind wir unsicher, mit dem neuartigen Schaltnetzteil eine hervorragende Marktresonanz sowie großes Marktpotential zu adressieren. Erste Präsentationen bei potentiellen Kunden verliefen äußerst vielversprechend.

Wir planen einen Serienstart mit einem Absatz einer Kleinserie mit dreistelliger Stückzahl im ersten Jahr, wobei wir unsere Fertigungskapazitäten möglichst schnell nach oben skalieren möchten. Dabei soll der Anteil der Netzteile aus unserem Haus mit GaN-Bausteinen statt herkömmlichen Silizium-Transistoren sukzessive erhöht werden. Begrenzendes Element der Skalierung ist die Verfügbarkeit der entsprechenden Transistoren. Bei realistischer Bewertung der momentanen Komponenten-Verfügbarkeit, der aktuellen Preisstruktur und den Anforderungsprofilen typischer Kundenanfragen ist realistischer Weise von der Produktion einer vierstelligen Stückzahl von GaN-basierten Netzteilen binnen drei Jahren nach Projektende auszugehen. Bei einer Marge von ca. 20% beim Absatz dieser Netzteile entsteht so ein mittelfristig extrem attraktives Produkt.

Bewertung des Umweltentlastungs-Effekts

Der angestrebte Wirkungsgrad von konstant ca. 97% kann nach dem Redesign des Systems beinahe komplett erreicht werden. Daraus ergeben sich Einsparungen im Energieverbrauch von ca. 10% im Vergleich zu konventionellen Netzteilen. Die Annahmen aus dem Antrag konnten damit im Wesentlichen bestätigt werden. Obwohl sich GaN-Bausteine bis heute nicht am Markt durchgesetzt haben, ist von einer Signalwirkung des neuartigen Netzteils nach der Markteinführung auszugehen.

Erste Kundenresonanz beispielsweise bei der Präsentation unserer Entwicklung als Prototyp auf Messen oder vor potentiellen Referenzkunden ist äußerst positiv. Dementsprechend sehen wir mittelfristig das Potential, mittelfristig einen wesentlichen Anteil der durch uns ausgelieferten Netzteile durch GaN-Netzteile zu substituieren – erwarten aber auch einen zunehmenden Wettbewerbsdruck durch Konkurrenten, die entsprechende Eigenentwicklungen auf den Markt bringen werden.

4. Fazit

Im Projekt konnte das ehrgeizige Ziel der Realisierung eines ultrakompakten und hocheffizienten Industrienetzteils erreicht werden.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden große Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Bauteil-Stabilität, Störeinflüsse in der (Eingangs-) Netzspannung sowie im Hinblick auf die EMV-Stabilität erfolgreich gemeistert werden.

In einem experimentellen Entwicklungsprozess wurde durch insgesamt dreimalige Iteration des Schaltungslayouts ein gegenüber EMV-Einflüssen äußerst robustes Schaltungslayout erarbeitet. Störeinflüsse durch Jitter auf der Netzspannung sowie Instabilitäten der Netzfrequenz werden durch eine Frequenzregelung des Eingangs abgefangen. Die Bauteilstabilität konnte durch die Überarbeitung der Schaltungstopologie zur Integration einer Transistorkaskade gewährleistet werden.

Im Ergebnis konnte ein Demonstrator realisiert werden, der im Zuge der Weiterentwicklung bis zur Serienreife einer erneuten Iteration des Schaltungslayouts unterzogen werden wird. Dabei wird das im Bericht bereits dargestellte Konzept zur räumlichen Anordnung der Komponenten umgesetzt werden, um auch das Ziel der äußerst kompakten Ausmaße des Systems vollständig zu erreichen.

Insgesamt konnten die im Antrag dargestellten Projektziele erreicht werden. Auch die skizzierten Effekte auf das Unternehmen sowie im Hinblick auf die Energieeffizienz und das Energie-Einsparpotential erscheinen auch nach Projektabschluss noch realistisch: Die Markteinführung unseres Systems verzögert sich durch das nötige Redesign der Schaltung. Das neue

Netzteil wird jedoch zur Markteinführung den Stand der Technik mindestens mitbestimmen, wenn nicht sogar neu definieren.