

Netzgeräte mit über 96% Wirkungsgrad durch Einsatz von GaN Transistoren

Abstrakt

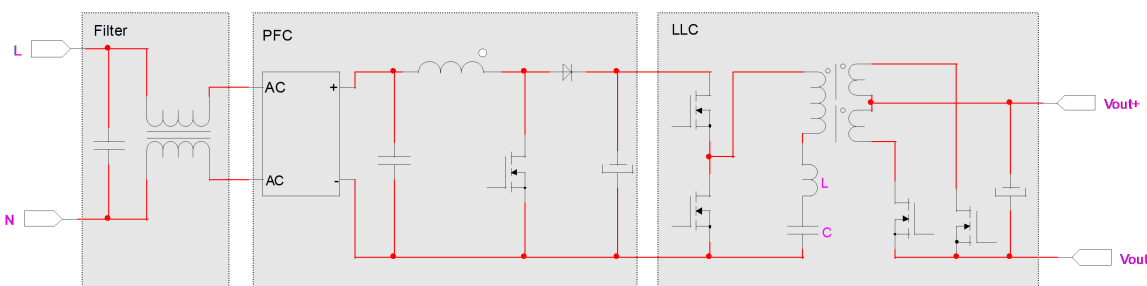
Heute sind sehr schnell schaltende Transistoren verfügbar: Super Junction MOSFETs (SJ), Silicon Carbid MOSFETs (SiC) und Transistoren auf Gallium Nitrid Basis (GaN), diese sind heute noch um ein Mehrfaches teurer als herkömmliche Transistorschalter, erlauben es aber, Netzgeräte und Gleichspannungswandler effizienter und kleiner zu konstruieren. In einer Design Studie wurde der Einsatz von GaN Transistoren in der PFC Stufe eines Traco Power Netzteils realisiert und vermessen. Die Vor- und Nachteile sowie die damit verbunden technischen Probleme wurden eingehend untersucht und dargestellt.

Artikel

Die Leistungselektronik hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant entwickelt. Der Grund dafür sind im Wesentlichen die immer schneller schaltenden Halbleiterschalter, die es erlauben, die elektrische Energie speichernden Bauteile wie Kondensatoren und Induktivitäten immer weiter zu verkleinern. Zusammen mit höheren Wirkungsgraden lassen sich so kleinere leistungselektronische Komponenten wie Netzteile und Gleichspannungswandler realisieren. Die Halbleiterschalter wurden über die letzten Jahrzehnte ständig weiterentwickelt. Die neuesten Halbleiterschalter wie Super Junction MOSFETs (SJ), Silicon Carbid MOSFETs (SiC) und Transistoren auf Gallium Nitrit Basis (GaN) erreichen Schalt-

zeiten die fast zehnmal kürzer sind als die herkömmlicher MOSFETs. Dies führt zu deutlich geringeren Schaltverlusten, was wiederum höhere Schaltfrequenzen erlaubt. Deshalb und wegen des höheren Wirkungsgrades können geringere Bauvolumen für Netzgeräte realisiert werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Vorteile nicht für alle Schaltungs-Topologien gilt, welche für Schaltnetzteile und Gleichspannungswandler verwendet werden. Mit der Verfügbarkeit von leistungsfähigen und preiswerten Steuerungs-ICs werden seit einigen Jahren bereits verschiedene Resonanzwandler-Konzepte eingesetzt, die sich dadurch auszeichnen, dass im Moment des Ein- oder Ausschaltens der Strom oder die Spannung am Schaltelement bereits Null ist und somit keine Verlustleistung bzw. Verlustenergie entsteht (ZVS oder ZIS: Zero Voltage Switching und Zero Current Switching). Weil bei diesen Schaltungskonzepten, meistens handelt es sich dabei um echte Resonanzwandler, prinzipbedingt keine Verlustleistung entsteht, ist bei Einsatz noch schneller schaltender Bauelemente, keine weitere Reduktion der Schaltverlustleistung zu erwarten. In Abbildung 1 ist zum Beispiel das Prinzip-Schaltbild eines typischen Industrienetzteils der Traco Power mit einem PFC Wandler am Eingang und einem Resonanzwandler am Ausgang dargestellt. Über die mit L und C bezeichneten Bauelemente fließt die gesamte elektrische Energie und die Werte des Kondensators und der Induktivität bestimmen durch die Resonanzfrequenz im Wesentlichen die Schaltfrequenz des Wandlers.



Typisches Prinzipschaltbild eines Netzgeräts der Firma Traco mit Hochsetzsteller am Eingang zur Erzeugung eines sinusförmigen Eingangsstroms und eines Resonanzwandlers zur Potentialtrennung und Spannungsregelung

Das Netzteil hat am Eingang einen Spannung hochsetzenden Gleichspannungswandler (PFC Wandler), welcher einen quasi sinusformen Netzeingangsstrom am Eingang zur Korrektur des Powerfaktors erzwingt. Der nachgeschaltete Resonanzwandler dient zur Anpassung des Spannungsniveaus, der galvanischen Trennung zur Netzspannung und der Ausregelung von Netzspannungs- und Laständerungen. Weil jedoch ein resonant oder semiresonant schaltender PFC Wandler sehr aufwendig und nur mit hoher Komplexität zu realisieren ist, bietet sich für diesen Hochsetzsteller die Verwendung der neu verfügbaren sehr schnell schaltenden Transistoren als aktive Hochfrequenzschalter an.

Um den Wirkungsgrad des Netzgerätes mit diesen schnell schaltenden Komponenten durch geringere Schaltungsverluste deutlich erhöhen zu können, müssen auch Durchlassverluste in Dioden und Gleichrichtern reduziert werden. Dazu bietet sich unter anderen eine sogenannte „Totem Pole“ Topologie für den Hochsetzsteller an. Damit kann der üblich verwendete Netzgleichrichter mit seinen relativ hohen Durchlassverlusten von vier Dioden auf zwei Dioden reduziert werden. Die Details dazu sind in Abbildung 2 dargestellt. Diese Schaltung wurde mit GaN Transistoren, aufgebaut und erprobt. Die Vor- und Nachteile sowie die damit einhergehenden technischen Herausforderungen werden im Folgenden dargestellt.

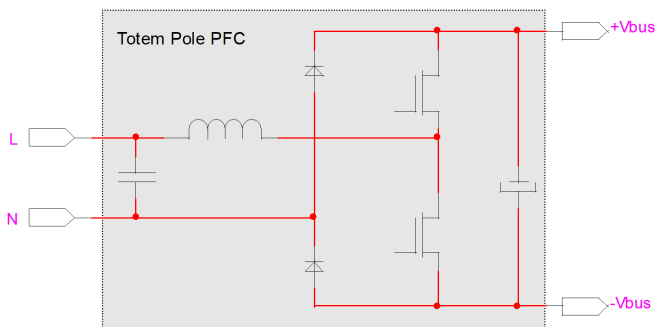


Abbildung 2: „Totem Pole Schaltung“ zur Korrektur des Power Factors des Netzeingangsstroms

Warum GaN?

Super Junction MOSFETS (SJ) schalten sehr schnell, sind leicht austauschbar, sind preiswert und gut verfügbar. Nachteilig ist die relative hohe Ansteuerleistung wenn sie bei höheren Schaltfrequenzen betrieben werden und die hohe Schaltverlustleistung, sowie die lange Erholzeit der Body-Diode im Reverse-Betrieb.

Silicon Carbide MOSFETs (SiC) sind schneller als SJ Mosfets, sind sehr gut für hohe Sperrspannungen geeignet, haben ein sehr robustes Avalanche Verhalten und eine Bodydiode mit sehr kurzen Rückwärtserholzeiten. Jedoch ist die Steuerung dieser Transistoren etwas aufwendiger, da eine negative Gate-Vorspannung notwendig sein kann.

Galliumnitrid (GaN) Transistoren sind generell in zwei verschiedenen Ausführungen erhältlich: selbst leitend und selbst sperrend. Daraus ergeben sich je nach Typ und Hersteller unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Gate Ansteuerung dieser Komponenten. Der Vorteil des GaN Transistors ist jedoch die bis zu zehnmal kürzere Schaltzeit und der Wegfall Body-Diode. Dieser Vorteil rechtfertigt unter Umständen den Mehraufwand für Kontrolle und Steuerung dieser Komponenten. Um alle Vorteile der GaN Transistoren vollständig nutzen zu können, ist eine aufwendigere Gate-Ansteuerschaltung notwendig, die oftmals bereits mit auf dem Chip des Leistungsschalters integriert ist. Der Nachteil dabei ist, dass Komponenten verschiedener Hersteller dann nicht mehr kompatibel und damit nicht einfach gegeneinander austauschbar sind.

Schnelles Schalten bei einem Hochsetzsteller (PFC Wandler) mit GaN Transistoren

In Abbildung 3 ist der Hochsetzsteller als „Totem Pole Schaltung“ aufgebaut. Die Ausgangsspannung ist immer höher als die Eingangsspannung. Die beiden Transistoren arbeiten dabei abwechselnd je nach Polarität der Eingangsspannung als aktiver Schalter oder als aktive Freilaufdiode für den Drosselstrom. Diese Transistoren werden alternierend mit einem Tastverhältnis „D“ und „(1-D)“ angesteuert. Benutzt man für die beiden Schalter die sehr schnell schaltenden GaN Transistoren, kann die Stufe mit kontinuierlichem Drosselstrom betrieben werden. Das heißt, der Drosselstrom muss nicht Null sein, wenn der Schalter ein- oder ausgeschaltet wird, weil nur sehr geringe Schaltverluste entstehen. Deshalb kann die Speicherdrossel mit wesentlich geringem Hochfrequenz Wechselstrom betrieben werden. Weil der Strom durch die Drossel und den Gleichrichterioden regelungstechnisch gut kontrolliert sind, können auch die Gleichrichterioden zur weiteren Reduzierung der Verlustleistung durch SJ Mosfets, welche sehr geringe Einschaltwiderstände aufweisen, ersetzt werden. Dies führt zu weiterer Reduktion der gesamten Verlustleistung und damit auch zur Erhöhung des Wirkungsgrades.

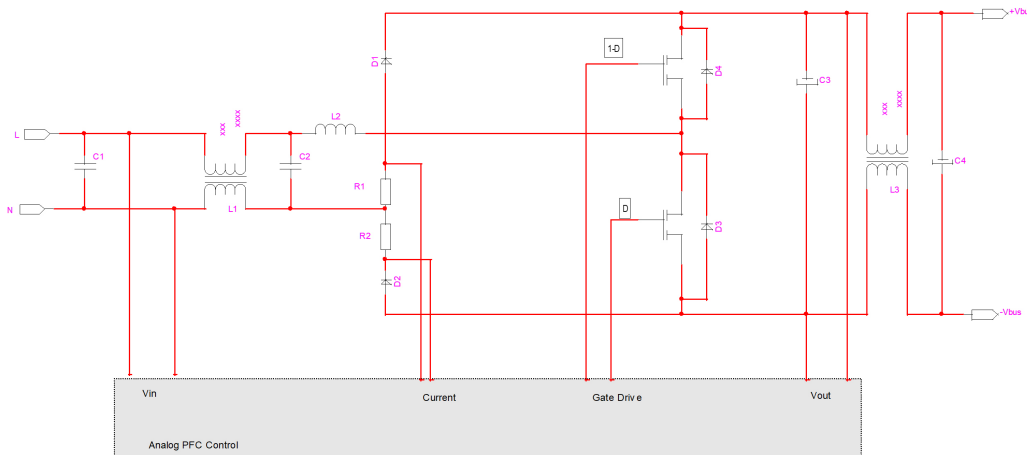


Abbildung 3 Totempole Eingangswandler mit Eingangs- und Ausgangsfilter zur Vermeidung von Funkstörungen

Weil die Schaltzeiten der GaN Transistoren nur einige Nanosekunden betragen, werden parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten zu sehr hochfrequenten Schwingungen angeregt, was zu erheblichen Störungen am Eingang und am Ausgang führt, was auch die Messungen stark beeinträchtigt. Deshalb sind die in Abbildung 3 dargestellten Filter verwendet worden. Die gemessenen Schaltsignale, jeweils gemessen zwischen Drain- und Source Anschluss der GaN Transistoren sind in Abbildung 4 dargestellt, der zugehörige Messaufbau in Bild 5. Bei dem verwendeten GaN Transistor wurde festgestellt, dass zur Vermeidung von Oszillationen während der Totzeit (GaN ist rückwärts leitend, Gate „off“) zu Drain-Source parallele SiC Dioden notwendig sind (D3 und D4). Die Messung des Ausschaltverhaltens der Drain-Source Spannung am GaN Transistor ist Abbildung 4 einmal mit und einmal ohne externe Paralleldioden dargestellt. Der Schaltvorgang dauert weniger als 7 Nanosekunden, ist also etwa zehnmal kürzer als bei Standard-MOSFETs. Damit reduzieren sich auch die Ein- und Ausschaltverluste um diesen Faktor im Vergleich zu konventionellen MOSFET Schaltern.

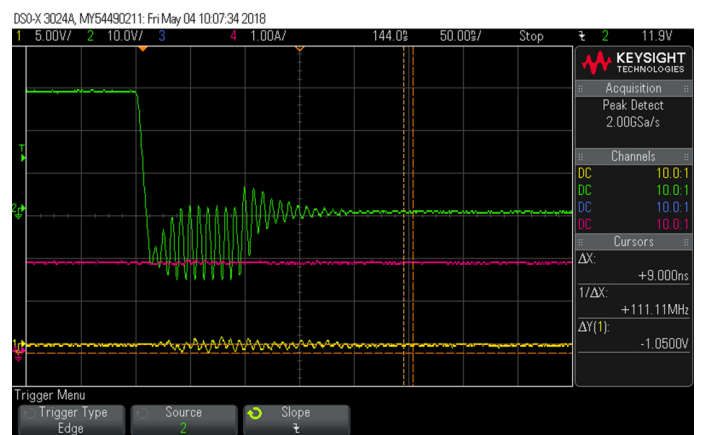


Abbildung 4b

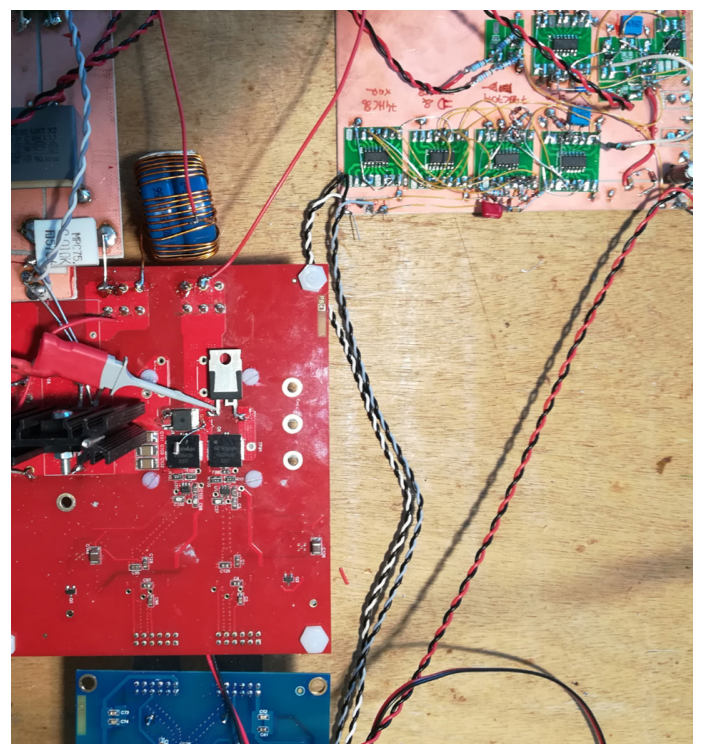


Abbildung 5: Messaufbau

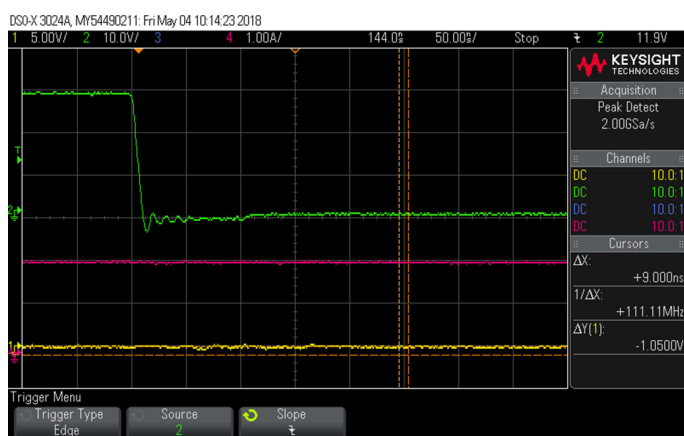


Abbildung 4a
Schaltverhalten eines GaN Transistors in einem PFC Wandler mit (a) und ohne (b) externen SiC Paralleldioden zur Vermeidung von Einschwingvorgängen

Die oben dargestellte Schaltung ist für eine Leistung von 1000 Watt ausgelegt und die beiden Schalttransistoren sind 80mOhm GaN Transistoren. Die Ansteuerung und Regelung wurde diskret und analog aufgebaut damit alle Betriebsparameter beeinflusst und eingestellt werden können. Die in Abbildung 4b dargestellten Schwingungen nach dem Abschalten verursachen schwer filterbare hochfrequente Störungen, welche einen großen Filteraufwand erfordern würden und müssen deshalb vermieden werden.

Kleinere Induktivitäten bei Verwendung von GaN Transistoren

Für die Effizienz des Hochsetzstellers (PFC Wandler) sind die Verluste und die Baugröße der Induktivität von entscheidender Bedeutung. Die gespeicherte Energie einer Induktivität verhält sich quadratisch zur Amplitude des Stroms beim Ein- und Ausschalten, ebenso steigen die Ohmschen Verluste quadratisch zum Strom. Die Ummagnetisierungsverluste in der Induktivität hingegen hängen vom Volumen des magnetischen Kerns, dem Wechselanteil des Stroms und damit vom Hub der Änderung der magnetischen Flussdichte und der Schaltfrequenz ab. Der evaluierte Versuchsaufbau wurde mit einer mittleren Schaltfrequenz von 100kHz betrieben. Die Messung des Drosselstroms für die Eingangsspannungen von 110VAC und 230VAC sind in Abbildung 6 dargestellt. Weil die Höhe der Stromwelligkeit von der Differenz der Eingangsspannung zur Boost-Spannung abhängt, ergibt sich bei niedriger Eingangsspannung (Abbildung 6a) eine größere Restwelligkeit des Stromes als bei Betrieb mit höherer Spannung (Abbildung 6b). Die Verlustwärme des magnetischen Materials der Induktivität sind bei geringer Eingangsspannung wesentlich größer und müssen deshalb für diesen ungünstigen Betriebsfall ausgelegt werden.

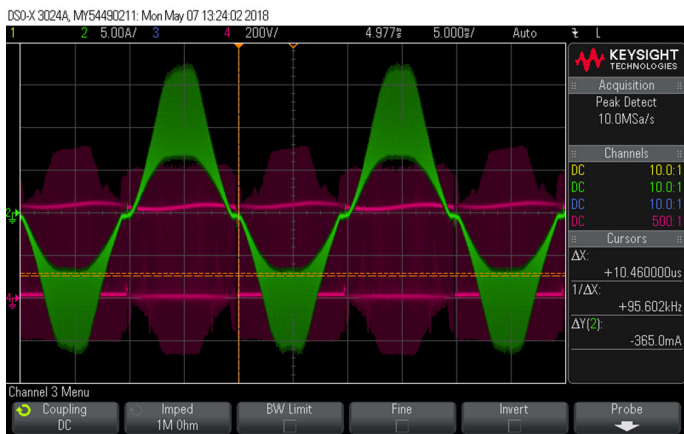


Abbildung 6a: Strom in der Drossel (L2) @ 110V

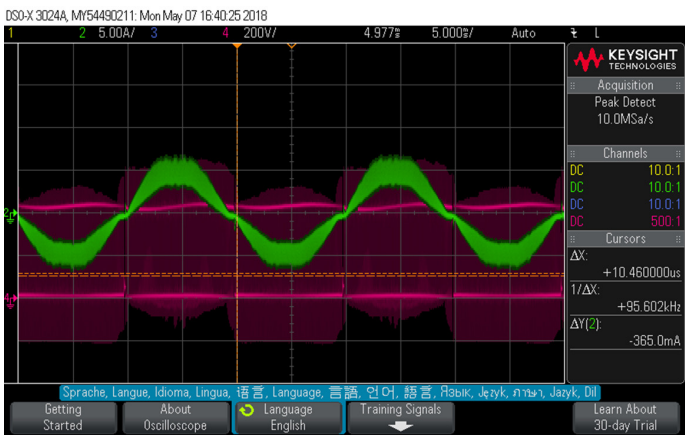


Abbildung 6b: Strom in der Drossel (L2) @ 230V

- Abbildung 6: Messung des Stroms in der Induktivität des Hochsetzstellers (PFC Wandlers) bei
- a) Netzeingangsspannung von 110VAC und
 - b) Netzeingangsspannung von 230VAC

Da die Kernverluste umso geringer sind je geringer die Welligkeit des Stroms in der Induktivität ist, bietet ein PFC Wandler mit GaN Transistoren die Möglichkeit magnetische Materialien für die Induktivität einzusetzen, die eine sehr hohe magnetische Sättigungsflussdichte aufweisen, trotz relativ hohen spezifischen Ummagnetisierungsverlusten. Dadurch können höhere Schaltfrequenzen bei geringer Schaltverlustleistung mit einigen hundert kHz eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine weitere Reduzierung des Bauvolumens der Induktivität.

Höhere Störungen durch schnelleres Schalten

Wegen der sehr kurzen Schaltvorgänge in den GaN Transistoren werden Rechteck-Ströme und -Spannungen erzeugt, die wegen der sehr steilen Ein- und Ausschaltflanken sehr hochfrequente Stör-Spannungen und -Ströme generieren. Diese sind unerwünscht und müssen gut gefiltert werden, damit keine elektromagnetischen Störungen vom Netzgerät an die Umgebung über die Anschlussleitungen oder durch Abstrahlung abgegeben werden. Die Gleichtaktstörungen sind am schwierigsten zu filtern, und Messungen dazu werden in Abbildung 7 dargestellt. Im Detail ist ersichtlich, daß sich die Gleichtaktspannung mit 100Hz sehr schnell umpolt, der hochfrequente Anteil wird durch Rückspeisung der aktiven Boost Diode verursacht. Dabei findet der Strom keinen Pfad über die Dioden D1 D2 und fließt somit als Gleichtaktstrom über den Y Kondensator ins Netz zurück. Durch eine intelligente Steuerung der aktiven Boost Diode und Ersatz der passiven Gleichrichterioden D1 D2 durch Mosfets kann dieser Strom erheblich reduziert werden.

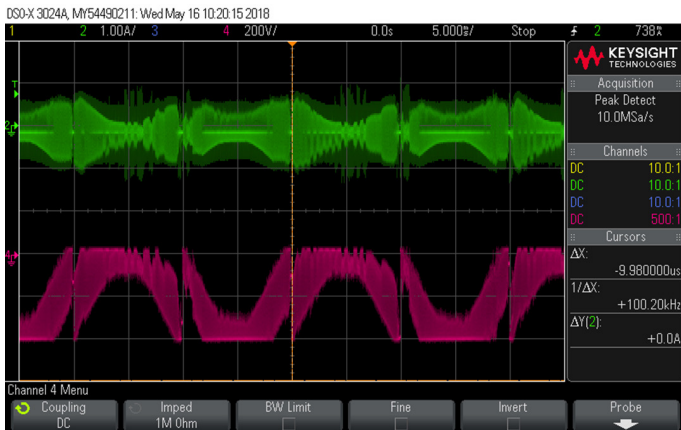


Abbildung 7: Gleichtaktstörstrom (grün) und Gleichtaktstörspannung (rot) beim PFC Wandler bei 1000Watt Vollast und bei einer Netzspannung von 230VAC

Verbesserter Wirkungsgrad und verringertes Bauvolumen mit GaN Transistoren

Der Wirkungsgrad eines PFC Wandlers setzt sich generell aus den Durchlass- und Schaltverlusten der Halbleiterschalter sowie den Ohmschen- und Magnetisierungsverluste der Induktivität zusammen. Die Gesamtverluste wurden gemessen und die Aufteilung der Einzelverluste wurde rechnerisch aufgeteilt und sind in Abbildung 8 dargestellt.

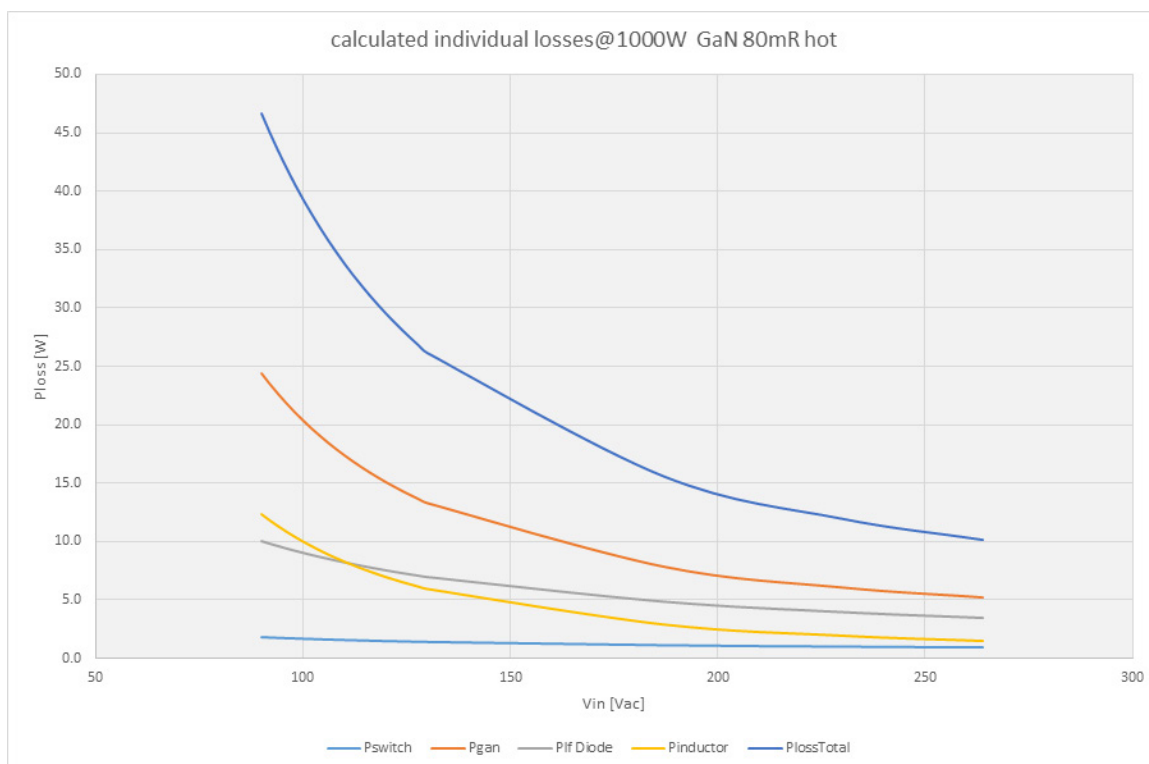


Abbildung 8: Aufteilung der Gesamtverlustleistung in Abhängigkeit der Netzeingangsspannung auf die einzelnen Komponenten bei 230VAC Netzspannung

Wegen der höheren Ströme bei niedriger Eingangsspannung und höheren Verlusten im magnetischen Material der Induktivität ist der Wirkungsgrad stark von der Netzeingangsspannung abhängig. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

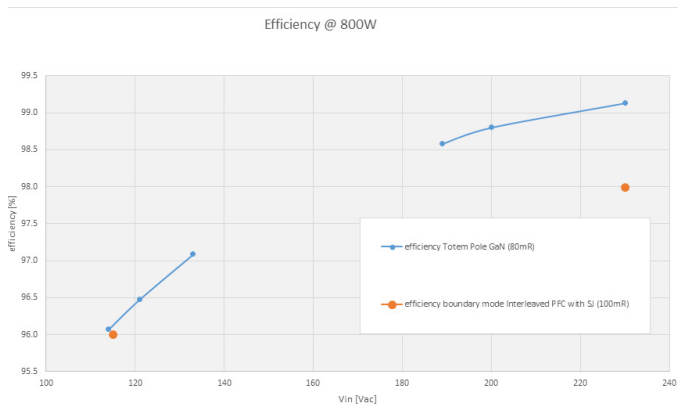


Abbildung 9: Gesamtwirkungsgrad des Totem Pole PFC Wandlers mit GaN Transistoren (blau) in Abhängigkeit der Netzeingangsspannung im Vergleich zu „Boundary mode Interleaved „ PFC mit SJ Mosfet

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit dem Einsatz von GaN Transistoren mit einer geeigneten Schaltungstopologie in PFC Wandlern ein sehr hoher Wirkungsgrad von über 99% erreicht werden kann, dass der ON-Widerstand der wirtschaftlich vertretbar einsetzbaren GaN Transistoren für kleine Netzspannungen jedoch noch deutlich zu hoch sind und dass für die Netzdioden aktiv geschaltete MOSFETs eingesetzt werden müssen. Es werden dann Wirkungsgrade erreicht, die 3 bis 5% über denen eines PFC Wandlers mit konventionellen MOSFETs mit Brückengleichrichter liegen. Im Zusammenwirken des PFC Wandlers mit einem Resonanzwandler in einem Netzgerät können damit Gesamtwirkungsgrade von über 96% erreicht werden.

Die Anwendung von GaN-Transistoren in Schaltnetzteilen eröffnet neue Möglichkeiten in Bezug auf Schaltfrequenz, Wirkungsgrad und Baugröße. Voraussetzung für einen wirtschaftlich vertretbaren Einsatz in Netzgeräten und Gleichspannungswandlern mit Leistungen bis 1000 Watt ist jedoch die weitere Reduktion der Preise für diese Komponenten.

Autor Sebastian Fischer, Dipl.-Ing.,
Geschäftsführer Traco Power Deutschland
Erich Hinterleitner, Entwicklungsingenieur
Traco Power

Datum Oktober 2019

Kontakt/ Rückfragen

Florian Haas
Traco Electronic AG
Sihlbruggstrasse 111
6340 Baar
Switzerland

Tel: +41 43 311 45 11
E-mail: f.haas@traco.ch
Fax: +41 43 311 45 45
Web: <http://www.tracopower.com>

TRACO POWER