

Steigerung der Effizienz von Induktionsanlagen

von **Christian Bender, Adrian Engel, Dirk M. Schibisch**

Frequenzumrichter sind leistungselektronische Geräte oder Anlagen, die elektrischen Strom mit gegebenen Parametern (Spannung, Strom, Frequenz, Phasenzahl) in elektrischen Strom mit anderen, zum Beispiel für das induktive Erwärmen erforderlichen Parametern umwandeln [1]. Somit spielen diese Leistungseinheiten eine bedeutende Rolle in modernen Thermoprozessanlagen, sowohl bezogen auf die Energieeffizienz, als auch auf die Gesamtkosten.

Enhancing the efficiency of induction heating plants

Frequency converters are electronic devices or systems that convert electric power with specific parameters (voltage, current, frequency, phases) into electric power with other parameters, required e.g. for induction heating. Therefore, these power supplies play an important role in advanced thermoprocessing plants for both energy efficiency as well as overall costs. The use of modern silicon carbide (SiC) devices provide remarkable advantages over conventional silicon (Si) components, especially with regard to power dissipation, size and weight as well as reduction of heat dissipation of the semiconductors.

Der Einbau moderner Bauelemente aus Siliziumkarbid (SiC) bietet im Ersatz konventioneller Silizium (Si)-Transistoren nennenswerte Vorteile bezogen auf die Verlustleistungen, Abmessungen, Gewicht und Reduzierung der Erwärmung der Halbleiter im Betrieb. Diese vergleichende Untersuchung geht insbesondere auf die Unterschiede von SiC-MOSFETs und Si-IGBTs in modernen Frequenzumrichtern für Induktionsanwendungen ein.

FUNKTION DES FREQUENZUMRICHTERS

Zur Nutzung des Induktionsprinzips muss in der Induktionsspule häufig ein Strom mit hoher Frequenz fließen. Dazu wird ein Frequenzumrichter benötigt, der die Umformung des Netzstromes mit einer Frequenz von 50 Hz in einen Strom mit wesentlich höherer Frequenz von einigen hundert Hertz bis einigen hundert Kilohertz übernimmt (**Bild 1**). Die Ausgangsfrequenz wird je nach Anwendung so gewählt, dass das Werkstück effizient und mit optimaler Temperaturverteilung erwärmt wird. Beispielsweise werden zum Härten hohe Frequenzen genutzt, da nur die Randschicht des zu härtenden Teils auf Austenitisierungstemperatur gebracht werden muss.

Die Umformung des Netzstromes geschieht üblicherweise in einem zweistufigen Prozess: der Netzstrom wird gleichgerichtet und der entstehende Gleichstrom von einem Wechselrichter in Wechselstrom in der gewünschten Frequenz umgewandelt. Die Hauptbestandteile des Gleichrichters sind Dioden oder Thyristoren. In universell nutzbaren Wechselrichtern werden Transistoren verwendet, da sich diese beliebig schalten lassen. Von den verschiedenen Arten von Transistoren sind hier IGBTs (engl.: insulated-gate bipolar transistor, dt.: Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode) und MOSFETs (engl.: metal oxide semiconductor field-effect transistor, dt.: Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) relevant. Letztere kommen bei besonders hohen Frequenzen von mehreren hundert Kilohertz zur Anwendung. Im Vergleich zu IGBTs schalten sie schneller; dafür ist im eingeschalteten Zustand die unerwünschte Durchlassspannung höher.

SILIZIUMKARBID IN DER LEISTUNGSELEKTRONIK

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiter-Bauelement zum Steuern elektrischer Spannungen und Ströme. Transistoren, gleich ob IGBTs oder MOSFETs, sind klassi-



Bild 1: Moderner IGBT-Frequenzumrichter in modularer Bauweise für Anwendungen in der Induktionstechnik (Quelle: SMS Elotherm)

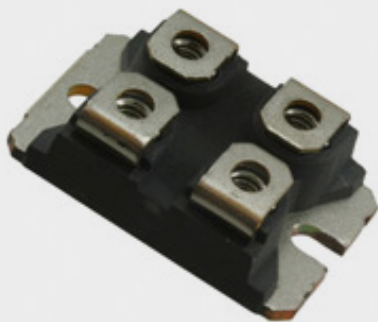


Bild 2a: Si-MOSFET, SiC-MOSFET identisch (Quelle: Internet)



Bild 2b: SiC-MOSFET (Quelle: Cree)



Bild 2c: Si-IGBT für Frequenzen bis 100 kHz (Quelle: Infineon)

scherweise aus Silizium (Si). Seit einigen Jahren wird auch Siliziumkarbid (SiC) als Halbleitermaterial verwendet. Die Technik zur Herstellung von SiC-Leistungshalbleitern für Industrieanwendungen hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht und wird sich in den nächsten Jahren weiterentwickeln, sowohl in qualitativer als auch in kommerzieller Hinsicht. Zuerst waren Bipolar-Transistoren und Sperrschicht-FETs aus Siliziumkarbid kommerziell verfügbar; anschließend kamen MOSFETs auf den Markt. Nachdem bis vor kurzem nur einzelne MOSFET-Chips für kleine Stromstärken erhältlich waren, gibt es inzwischen auch Leistungsmodule, die sich in Umrichtern im mittleren kW-Bereich sinnvoll nutzen lassen.

Dadurch stehen die Vorteile der neuen Technik auch Induktionsumrichtern zur Verfügung. Gegenüber Silizium-Transistoren sind solche aus Siliziumkarbid in mehreren Punkten überlegen. Zum einen entsteht in SiC-Transistoren weniger Verlustleistung. Dies betrifft alle Verlustleistungsanteile, die beim Betrieb von Transistoren entstehen: im eingeschalteten Zustand (Durchlassverluste), im ausgeschalteten Zustand (Sperrverluste), beim Ein- und Ausschalten (Schaltverluste) und in der Treiberschaltung durch das Ansteuern (Steuerverluste). Zum anderen ist die Wärmeleitfähigkeit von Siliziumkarbid höher als die von Silizium, sodass die entstehende Verlustwärme besser abgegeben werden kann.

Beides zusammen, die geringere Verlustleistung und die damit hohe Energieeffizienz sowie die reduzierte Erwärmung im Betrieb, haben zur Folge, dass die gleiche Chipfläche mehr Strom führen und schalten kann. So können SiC-Komponenten in entsprechend kleinere Gehäuse mit leichteren, dünneren und kostengünstigeren Kühlkörpern eingebaut werden. Dadurch werden bei gleich hoher oder höherer Schaltfrequenz die Gesamtkosten gesenkt.

VORGEHENSWEISE BEI DER UNTERSUCHUNG

Aus dem breiten Sortiment der Induktionsumrichter von SMS Elotherm wurden zwei Typen ausgewählt, um die neuesten SiC-MOSFETs verschiedener Hersteller zu testen. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die SiC-MOSFETs (**Bild 2a und b**) sowohl mit Si-MOSFETs (**Bild 2a**) als auch mit Si-IGBTs (**Bild 2c**) experimentell verglichen. Maßgebende Kriterien waren dabei die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung bei den Schaltvorgängen sowie die von den Bauelementen verursachte Gesamtverlustleistung beim Betrieb in verschiedenen Arbeitspunkten und unterschiedlichen Ausgangsfrequenzen. Der Vergleich mit Si-MOSFETs fand in einem Hochfrequenz (HF) -Umrichter für Ausgangsfrequenzen ab 100 kHz statt. Als Referenzmaß für das Leistungsvermögen in den Mittelfrequenz (MF)-Umrichtern für

Ausgangsfrequenzen bis 100 kHz gelten die derzeit dort verwendeten Si-IGBTs.

VERGLEICHBARKEIT DER TRANSISTOREN

In der Regel werden Leistungshalbleiter nach ihrer Blockierspannung und dem maximal zulässigen Dauerstrom definiert. Die folgenden Vergleiche beziehen sich somit auf Transistoren, die sich in diesen Parametern ähnlich sind und zudem in einem äußerlich gleichen Gehäuse untergebracht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei zunehmenden Frequenzen der Nennstrom eines Transistors an Bedeutung verliert, da sich die Grenzen eines Halbleitermoduls nicht nur durch den Strom, sondern durch die maximal abführbare Verlustwärme ergeben.

Der folgende Vergleich, basierend auf den Angaben in den Datenblättern der Komponenten, zeigt, was das für die Stromtragfähigkeit und die Wärmeabfuhr vergleichbarer Transistoren in den verschiedenen Technologien bedeutet: wenn Bauteile mit ähnlicher Stromtragfähigkeit und dem gleichen Gehäuse gegenübergestellt werden, so fällt auf, dass ein Si-MOSFET deutlich mehr Verlustwärme abführen kann als ein Si-IGBT, da die Chipfläche des MOSFETs um den Faktor 2-3 größer ist [2]. Ein SiC-MOSFET ist deutlich kleiner als ein vergleichbarer Typ aus Silizium, sodass dieser trotz der besseren Wärmeleitfähigkeit weniger Verluste abführen kann. Die maximal zulässige Verlustleistung liegt auf dem Niveau eines Si-IGBTs (**Bild 3**).

VERGLEICH MIT SILIZIUM-MOSFETS

Bei SMS Elotherm werden seit vielen Jahren Si-MOSFETs für HF-Umrichter mit Frequenzen zwischen 100 kHz und 600 kHz eingesetzt. In einer solchen Leistungseinheit wurden Si-MOSFETs mit 1000 V Blockierspannung mit SiC-MOSFETs der 1200V-Klasse verglichen. Die Halbleiterindustrie hat SiC-MOSFET-Module im gleichen Gehäuse gebaut, die bei vergleichbarem Nennstrom Si-MOSFETs in Punkto Blockierspannung, Schaltgeschwindigkeit und Einschaltwiderstand ($R_{DS(on)}$) bei weitem überlegen sind. Wie bereits erwähnt ist der dazu benötigte SiC-Chip sogar wesentlich kleiner als das Pendant aus Silizium. Einerseits macht dies die SiC-MOSFETs bereits heute wirtschaftlich interessant, da der Preisunterschied zu herkömmlichen MOSFETs nur noch gering ist. Andererseits lassen sich weniger Verluste abführen, da der Wärmewiderstand von der Sperrschicht zum Gehäuse größer ist. Für hochfrequente Induktionsanlagen, in denen die Verluste der begrenzende Faktor sind, ist dies zunächst einmal ein Nachteil. Doch wie sieht die Gesamtbilanz aus? Die Untersuchung sucht Antworten auf Fragen nach dem Wirkungsgradunterschied und der Leistungsausbeute pro Transistor. Abschließend wird die neue Technologie auf ihre Einsatzgrenzen hin untersucht, die heute noch bestehen.

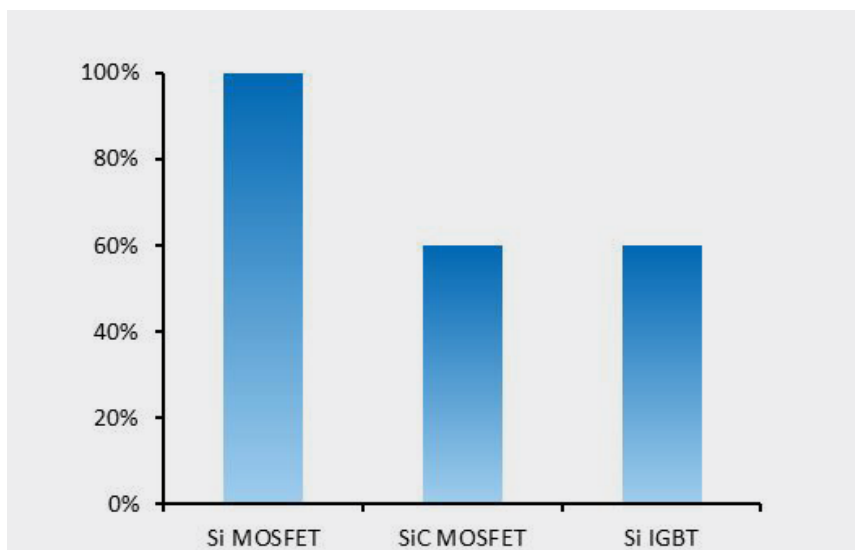


Bild 3: Vergleich der abführbaren Verlustleistung bei gleicher Stromtragfähigkeit (normiert)

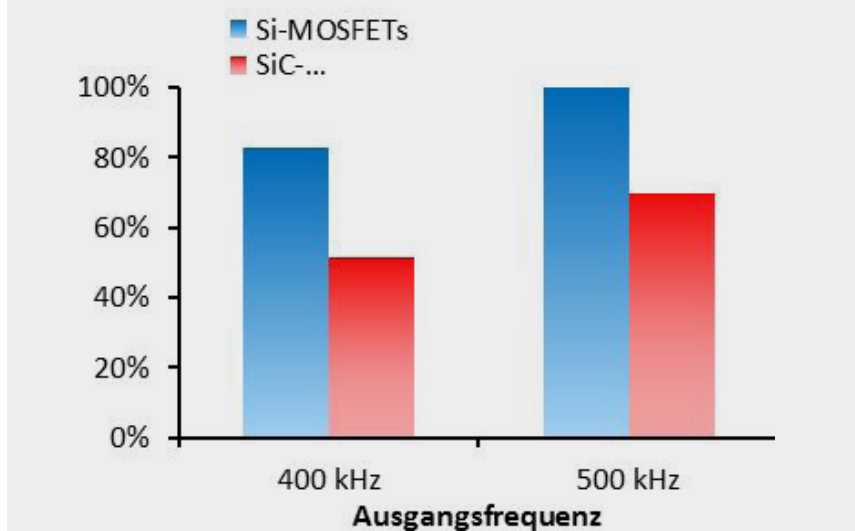


Bild 4: Verlustleistung von Si- und SiC-MOSFETs bei verschiedenen Ausgangsfrequenzen (normiert)

Der reduzierte Einschaltwiderstand der SiC-MOSFETs verringert die Durchlassverluste im Vergleich zu Si-MOSFETs (**Bild 4**). Dies macht sich bei resonant schaltenden Applikationen selbst bei hohen Schaltfrequenzen bemerkbar, da die Schaltverluste durch Zero Voltage Switching (ZVS), also dem spannungslosen Schalten von Transistoren, und Zero Current Switching (ZCS), also dem stromlosen Schalten von Transistoren, minimiert werden und deshalb die Durchlassverluste stark ins Gewicht fallen. Dies alleine reicht jedoch noch nicht aus, um die schlechtere Wärmeabfuhr zu kompensieren. Um in den getesteten Applikationen die Leistungsausbeute herkömmlicher Si-MOSFETs zu erreichen, muss die Schaltgeschwindigkeit erhöht werden. Prinzipiell

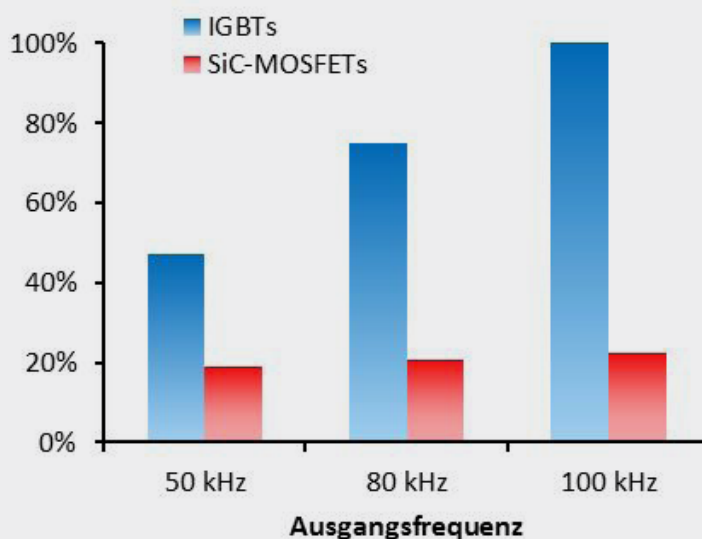


Bild 5: Verlustleistung von IGBTs und SiC-MOSFETs bei verschiedenen Ausgangsfrequenzen (normiert)

ist dies bei SiC-MOSFETs sehr gut möglich. Durch die verhältnismäßig geringe Gatekapazität können selbst mit schwachen Gatetreibern sehr schnelle Schaltvorgänge erzielt werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass selbst die Schaltgeschwindigkeit von herkömmlichen MOSFETs oft nicht voll ausgenutzt werden kann, da dies zu massiven Problemen führt. Das schnelle Schalten begünstigt ungewollte Einkopplungen in die Systemelektronik und Messtechnik des Umrichters. Außerdem erhöht sich der Einfluss der parasitären Kommutierungsinduktivitäten, welche sich beim Aufbau eines Wechselrichters nie ganz vermeiden lassen. Durch schnelles Abschalten können Überspannungen oder in Verbindung mit parasitären Kapazitäten auch hochfrequente Oszillationen entstehen. Mit der Schaltgeschwindigkeit steigen somit die Anforderungen an den Aufbau des Wechselrichters und die Störfestigkeit der Elektronikbaugruppen. Mit der Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit und der Lösung der damit verbundenen EMV-Störungen konnten auch in dieser Anwendung die Verluste um ein Drittel reduziert werden.

Betrachtet man dies zusammen mit der Tatsache, dass weniger Verluste erlaubt sind, kommt man zu dem Schluss, dass die Leistungsausbeute pro Transistor vergleichbar ist. Ein Wechselrichter bestimmter Leistung und Frequenz benötigt somit dieselbe Anzahl an Transistoren aus Si oder SiC. Für den verbesserten Wirkungsgrad muss zurzeit mit ungefähr den 1,5-fachen Halbleiterkosten gerechnet werden. Es bleibt zu erwähnen, dass sich die gleich gebliebene Leistungsausbeute

bei erhöhter Effizienz zwar mit der gleichen Anzahl an Transistoren im selben Gehäuse, aber mit weniger Chipfläche erreichen lässt. Allerdings sind die heute auf dem Markt verfügbaren SiC-MOSFET-Chips noch im gleichen Gehäuse untergebracht, in dem auch die wesentlich größeren Si-MOSFETs Platz finden. Tatsächlich ließe sich das Gehäuse mit einem größeren SiC-MOSFET thermisch voll ausnutzen. Ein solches Bauteil wäre von der Stromtragfähigkeit und den Kosten nicht mehr mit dem gleich großen Pendant aus Silizium zu vergleichen. Thermisch gesehen wäre es jedoch vergleichbar mit den Silizium-MOSFETs. In Verbindung mit der reduzierten Verlustleistung ist im Vergleich zu Si-MOSFETs im selben Gehäuse eine deutlich höhere Leistungsausbeute zu erwarten. Weniger Transistoren führen zu einem kompakteren Aufbau, was zur Reduzierung der parasitären Induktivitäten führt und somit ggf. eine Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit zulässt.

VERGLEICH MIT SILIZIUM-IGBTs

MF-Umrichter von SMS Elotherm für Ausgangsfrequenzen bis 100 kHz sind mit sehr schnell und verlustarm schaltenden IGBTs ausgestattet [3]. Trotzdem ist die Ausgangsleistung des Umrichters bei hohen Ausgangsfrequenzen (ab ca. 20 kHz) von der in den Wechselrichter-IGBTs entstehenden Verlustleistung begrenzt. Die Verlustleistung wird hauptsächlich durch das Schalten verursacht. Gerade bei hohen Ausgangsfrequenzen ist deshalb von Transistoren aus Siliziumkarbid ein deutlicher Vorteil zu erwarten.

Bei einer Ausgangsfrequenz von 100 kHz beträgt bei gleicher Ausgangsleistung die Verlustleistung im Wechselrichter mit SiC-MOSFETs lediglich 28% im Vergleich zu Si-IGBTs. Auch bei kleineren Frequenzen ist ein deutlicher Vorteil der SiC-MOSFETs zu beobachten, wenngleich der Unterschied zu den Si-IGBTs kleiner ausfällt. In **Bild 5** sind die in den Wechselrichtertransistoren entstehenden Verlustleistungen bei verschiedenen Ausgangsfrequenzen vergleichend für MOSFETs und IGBTs dargestellt.

Bei den IGBTs ist deutlich die starke Abhängigkeit der Verlustleistung von der Ausgangsfrequenz zu erkennen. Deswegen muss bei hohen Frequenzen die Ausgangsleistung reduziert werden, um die Halbleiter nicht durch Überhitzung zu zerstören. Bei den SiC-MOSFETs hingegen ist die entstehende Verlustleistung einerseits fast unabhängig von der Ausgangsfrequenz und andererseits signifikant kleiner als die von den IGBTs verursachte (**Bild 6**). Damit kann bei allen Ausgangsfrequenzen ein hoher Wirkungsgrad des Umrichters erzielt werden. Eine Reduzierung der Ausgangsleistung bei hohen Frequenzen ist nicht erforderlich.

Wird zum Beispiel eine Ausgangsleistung von 120 kW bei Frequenzen über 20 kHz benötigt, muss bei IGBT-Umrichtern eine höhere Umrichterleistungs-klasse

gewählt werden. In diesen Fällen bieten die MOSFETs aus Siliziumkarbid den klaren Vorteil, dass der Umrichter auch bei hohen Ausgangsfrequenzen die volle Ausgangsleistung liefert und die Kosten für einen leistungsstärkeren Umrichter nicht anfallen.

Aber nicht nur in der Anschaffung, sondern auch im Betrieb lassen sich mit den Siliziumkarbid-MOSFETs wirtschaftliche Vorteile erzielen: wegen der deutlich kleineren Verluste im Wechselrichter ist ein Gesamtwirkungsgrad des Umrichters von bis zu 99% möglich. Dies führt zu einem verminderten Energieverbrauch des Gesamtsystems. Außerdem lassen sich durch den geringeren Kühlaufwand Bauraum und somit letztendlich auch Kosten sparen.

Ein weiterer Vorteil der SiC-MOSFETs gegenüber den IGBTs ist das schnellere Schaltverhalten, insbesondere beim Ausschalten. Dadurch sind die zeitlichen Verläufe von Ausgangsstrom und -spannung des Umrichters sehr nahe an den Idealverläufen (**Bild 7**). Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Leistungshalbleiter im Wechselrichter optimal betrieben werden und keine unerwünschten Effekte auftreten, die unter Umständen die Betriebssicherheit mindern könnten.

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass MOSFETs aus Siliziumkarbid den Silizium-IGBTs in den bis 100 kHz erhältlichen MF-Umrichtern überlegen sind.

FAZIT

Moderne Systeme zur Leistungsumwandlung sind zwingend notwendig, um den immer strengeren Energieeffi-

zienz-Standards gerecht zu werden und die Kosten des Gesamtsystems für den Anwender zu senken. Diese Ziele sind bei gleichzeitiger Leistungssteigerung mit herkömmlichen Halbleitermaterialien nur schwer zu erreichen, so dass die Einführung neuer Komponenten aus Siliziumkarbid viele Möglichkeiten bietet.

MOSFETs aus Siliziumkarbid vereinen die Vorteile einer niedrigen Durchlassspannung und eines schnellen Schaltens in einem Bauelement. Dagegen muss man sich beim Halbleitermaterial Silizium durch Auswahl des Transistortyps IGBT oder MOSFET für einen Vorteil entscheiden und den Nachteil bei der anderen Eigenschaft dulden.

Der Vergleich mit Si-MOSFETs bei Frequenzen über 100 kHz hat gezeigt, dass sich die gleiche Leistungsausbeute bei reduzierter Verlustleistung mit einer deutlich kleineren Chipfläche erzielen lässt. Eine Reduzierung der Baugröße des Wechselrichters ist jedoch nur dann möglich, wenn das Gehäuse des Transistors thermisch genauso gut genutzt wird wie in der Si-Technologie. Das bedeutet, dass die Chipfläche des SiC-MOSFETs der abführbaren Verlustleistung des Gehäuses angepasst werden muss. Dies ist bei SiC-MOSFETs mit vergleichbarem Nennstrom nicht gewährleistet.

Insgesamt aber werden die Fortschritte in der Fertigungstechnik dazu führen, dass SiC-Transistoren konventionelle Si-Komponenten in hochfrequenten Induktionsanlagen mehr und mehr ersetzen und die Gesamtanlagen nicht nur energieeffizienter, sondern gleichzeitig kostengünstiger und kompakter werden können.

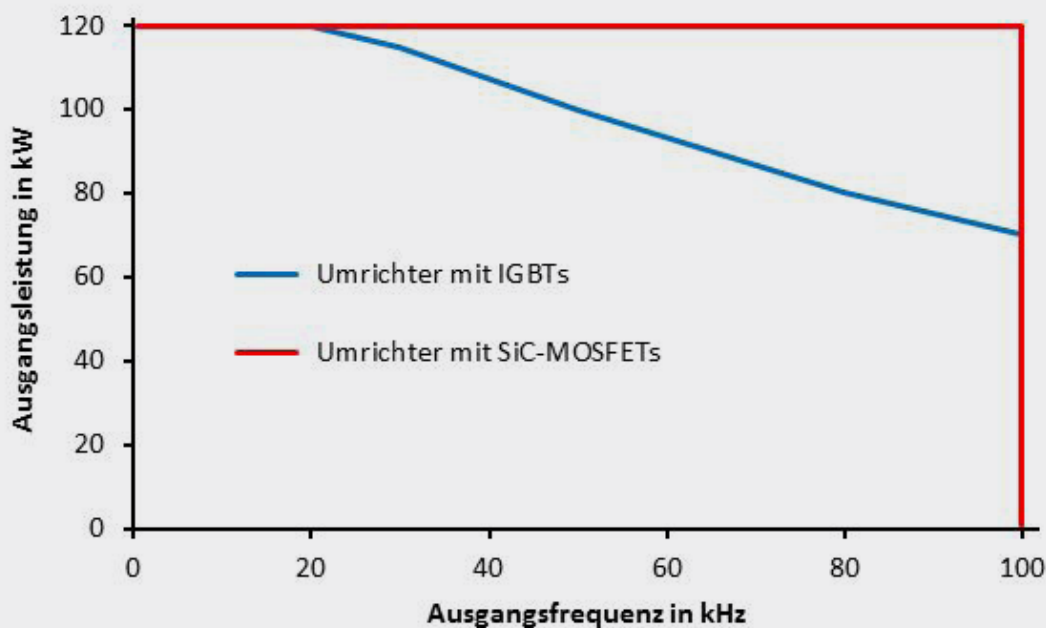


Bild 6: Erforderliche Reduzierung der Umrichterausgangsleistung abhängig von der Ausgangsfrequenz

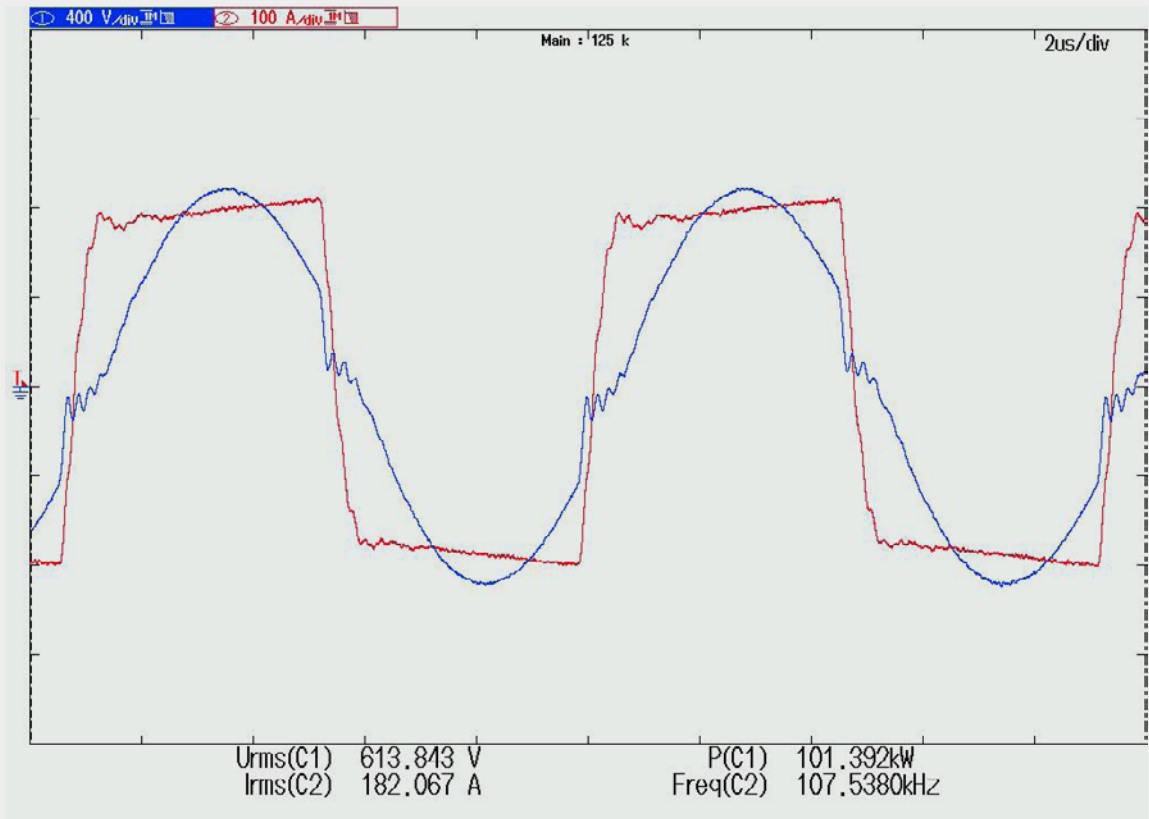


Bild 7: Zeitliche Verläufe der Ausgangsspannung (blau) und des Ausgangsstromes (rot)

LITERATUR

- [1] Edmund Zok: Grundlagen der Energieversorgung für die induktive Erwärmung; Induktives Erwärmen, Vulkan Verlag 2014, S. 230
- [2] Thorsten Bülo: Methode zur Evaluation leistungselektronischer Schaltungstopologien für die Anwendung in dezentralen Netzeinspeisern kleiner Leistung, Kassel university press, Kassel, 2010
- [3] Edmund Zok, Hans G. Matthes: Kritische Halbleiterbelastungen im Schwing-kreisumrichter, in: Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, Tagungsbericht ETG-Fachtagung, Bad Nauheim, 2002

AUTOREN



M. Sc. **Adrian Engel**
 SMS Elotherm GmbH
 Remscheid
 Tel.: 02191/ 891- 686
 a.engel@sms-elotherm.com



M. Sc. **Christian Bender**
 SMS Elotherm GmbH
 Remscheid
 Tel.: 02191/ 891- 689
 c.bender@sms-elotherm.com



Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Dirk M. Schibisch**
 SMS Elotherm GmbH
 Remscheid
 Tel.: 02191/ 891-300
 d.schibisch@sms-elotherm.com