

Elektronik *automotive*

Fachmedium für professionelle Automobilelektronik



Elektrofahrzeuge effizient laden dank SiC-MOSFETs:

Minimale Schaltverluste

>> Seite 20



Automatisierte
Mobilität braucht
„Koopkurrenz“

>> Seite 10



Testszenarios
für die V2X-
Kommunikation

>> Seite 36



Sensordaten hoher
Integrität für das
autonome Fahren

>> Seite 40



Über
7,9 Millionen
Produkte Online

DIGIKEY.DE

Elektrofahrzeuge effizient laden dank SiC-MOSFETs:

Minimale Schaltverluste



(Bild: Rohm Semiconductor)

Beim Laden von Elektrofahrzeugen sind ein hoher Wirkungsgrad sowie die Flexibilität, an unterschiedlichen Netzen laden zu können, von großer Bedeutung. Insbesondere bei der Ladetechnik im Fahrzeug sind zudem geringes Volumen und Gewicht essenziell. So beeinflusst unter anderem die Art des SMD-Gehäuses, ob sich SiC-Trench-MOSFETs für die Leistungselektronik in On-Board-Ladesystemen aber auch für andere Anwendungen im Fahrzeug eignen.

Von Christian Felgemacher und Aly Mashaly

Wichtige Design-Kriterien für On-Board-Ladegeräte in Elektrofahrzeugen sind zum einen eine hohe Leistungsdichte und zum anderen geringe Kosten. Zur Steigerung der Leistungsdichte ist die Reduktion des Volumens passiver Bauteile von erheblicher Bedeutung, was hohe

Schaltfrequenzen erforderlich macht. Gleichzeitig sind minimale Verluste in den Leistungshalbleitern wichtig, um den Aufwand zur Kühlung klein zu halten, weil ansonsten Kosten und Volumen des Kühlsystems steigen. Um beide Ziele zu erreichen, sind Leistungshalbleiter mit minimalen Schaltverlusten

erforderlich. Dafür bieten sich Siliziumkarbid-MOSFETs (SiC-MOSFETs) sowie SiC-Schottky-Dioden an. Im Gegensatz zu den traditionell in den relevanten Spannungs- und Leistungsbereichen eingesetzten Silizium-IGBTs handelt es sich bei SiC-MOSFETs wie auch SiC-Schottky-Dioden um unipolare Bauteile. Daraus resultieren erheblich reduzierte Schaltverluste.

Flexibilitätsanforderungen an Ladesysteme

Auch die Flexibilität, sowohl an einer einphasigen als auch einer dreiphasigen Stromversorgung laden zu können, ist ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung des Ladesystems. Für eine typische Ladeleistung von 11 kW besteht ein möglicher Ansatz zum Beispiel darin, drei einphasige 3,7-kW-

650 V	30 mΩ	60 mΩ	80 mΩ	120 mΩ	1200 V	40 mΩ	80 mΩ	105 mΩ	160 mΩ
SCT3xxxKW7	✓	✓	✓	✓	SCT3xxxKW7	✓	✓	✓	✓

Tabelle 1. Geplantes Line-up von SiC-Trench-MOSFETs im TO-263-7L-Gehäuse.

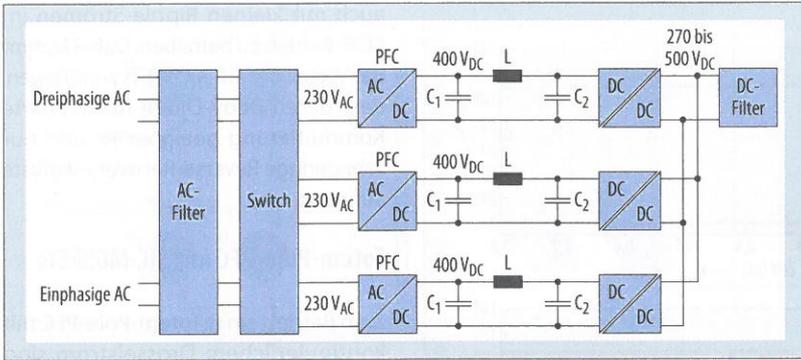


Bild 1. 11-kW-Ladesystem bestehend aus 3,7-kW-Einheiten. (Quelle: Rohm Semiconductor)

Leistungsfaktorkorrektur-Stufen (Power Factor Correction, PFC) wie in Bild 1 zu sehen ist zu kombinieren. Durch eine Schaltmatrix am Eingang lässt sich das System sowohl an einer 16 A/400 V-Drehstromversorgung als auch an einer einphasigen Versorgung – zumindest bis zur zulässigen Anschlussleistung – betreiben.

Als Wandlerelemente werden in diesem Fall möglichst kompakte und effiziente 3,7-kW-PFC-Gleichrichter sowie galvanisch getrennte Spannungswandler benötigt. In beiden Reglerstufen können SiC-MOSFETs sowie SiC-Schottky-Dioden zum Einsatz kommen, um eine hohe Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Vorteile moderner SMD-Gehäuse für schnell schaltende Halbleiter

SiC-MOSFETs können äußerst niedrige Schaltverluste erreichen und damit helfen, die Verluste in leistungselektronischen Wandlern zu minimieren. Um das Potenzial der Halbleiter möglichst optimal auszuschöpfen, werden moderne Gehäusetyper eingesetzt. Bild 2 zeigt eines der am meisten verbreiteten Gehäuse für Leistungshalbleiter. Die Beinchen des Gehäuses stellen nicht zu vernachlässigende parasitäre Induktivitäten dar. Diese sind auch in der vereinfachten Darstellung einer Gate-Ansteuerung dargestellt. Die Beinchen an Drain und Source sind Teil des Laststromkreises und tragen so zu Überspannungen beim Ausschalten bei, was die erreichbare Stromteilheit begrenzen kann.

Neben der Induktivität des Gate-Beinchen ist auch die Source-Induktivität Teil der Gate-Ansteuerungsschleife. Diese Induktivität wird insbesondere beim Einschalten des SiC-MOSFETs relevant, weil die effektive Gate-Spannung am Chip durch den induktiven Span-

nungsabfall U_{L_S} über diese Induktivität vermindert wird, was die Einschaltgeschwindigkeit reduziert und damit die Einschaltverluste erhöht. Dieser Effekt ist in Bild 3 dargestellt.

Moderne Halbleitergehäuse wie das SMD-Gehäuse TO-263-7L bieten deutliche Vorteile für schnell schaltende Halbleiter. Zum einen weisen diese Gehäuse insgesamt geringere parasitäre Induktivitäten auf, weil die Verbindungen zur Leiterkarte flächig oder über mehrere parallele Beinchen erfolgt. Zum anderen steht ein separates Beinchen für die Verbindung des Gate-Treibers mit dem Source-Potenzial des MOSFETs zur Verfügung. Durch diesen „Driver Sense“ findet keine Reduzierung der effektiven Gate-Spannung im Einschaltmoment statt und das Bauteil kann erheblich schneller und damit verlustärmer einschalten. Diese Trennung des Laststrompfads vom Gate-Strompfad ist in Bild 4 dargestellt.

Um den Effekt dieser Gehäusevorteile auf die Leistungsfähigkeit des Halbleiters darzustellen, sind in Bild 5 die Schaltverläufe für den gleichen 1200-V-40-mΩ-SiC-MOSFET in zwei unterschiedlichen Gehäusen illustriert. Die bereits genannten Vorteile des Gehäuses resultieren in geringeren Schaltverlusten und einer besseren Ausnutzung der Performance des SiC-Chips.

In Kürze wird ein umfangreiches Line-up von SiC-Trench-MOSFETs im TO-263-7L Gehäuse sowohl mit 650 V als auch mit 1200 V nomineller Sperrspannung für den Markt freigegeben. Auch Automotive-qualifizierte Varianten (gemäß AECQ-101) sind in Planung wie Tabelle 1 verdeutlicht. Diese SMD-Varianten des SiC-Trench-MOSFETs lassen sich beispielsweise zur Realisierung kompakter PFC-Gleichrichter und Spannungsreglerstufen für On-Board-Ladesysteme nutzen.

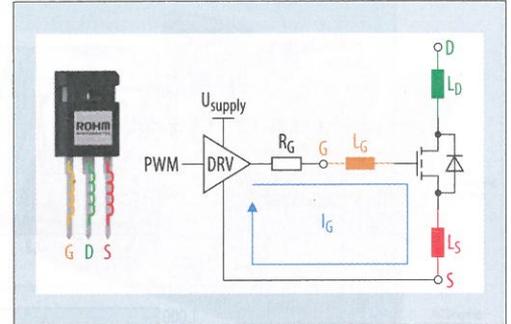


Bild 2. Traditionelles Halbleitergehäuse mit parasitären Induktivitäten. (Quelle: Rohm Semiconductor)

SiC-MOSFETs im SMD-Gehäuse in On-Board-Ladegeräten

Wie bereits erwähnt, besteht eine Möglichkeit zur Realisierung flexibel einsetzbarer 11-kW-Ladesysteme darin, mehrere 3,7-kW-PFC-Stufen und entsprechende isolierte Gleichspannungswandler zu kombinieren. Zur Realisierung der PFC-Stufe kommen verschiedene Topologien in Betracht. Einige der möglichen Optionen sind in Bild 6 dargestellt. Die wohl einfachste Schaltung zur Realisierung einer einphasigen PFC-Stufe ist die Boost-PFC-Topologie. Dabei wird eine Dioden-Gleichrichterbrücke mit einer Aufwärtsstufe, meist bestehend aus einem Superjunction-MOSFET

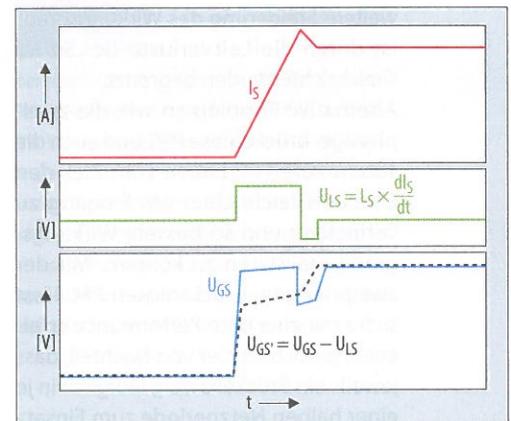


Bild 3. Reduzierte Gate-Spannung am Chip im Moment des Schaltens durch L_S . (Quelle: Rohm Semiconductor)

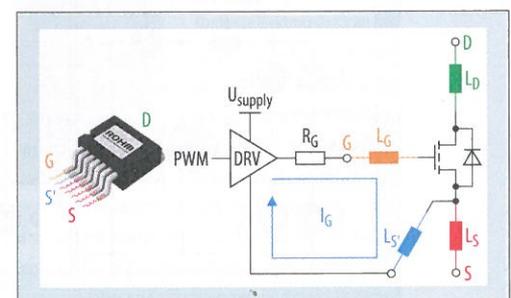


Bild 4. TO-263-7L mit Driving Sense. (Quelle: Rohm Semiconductor)

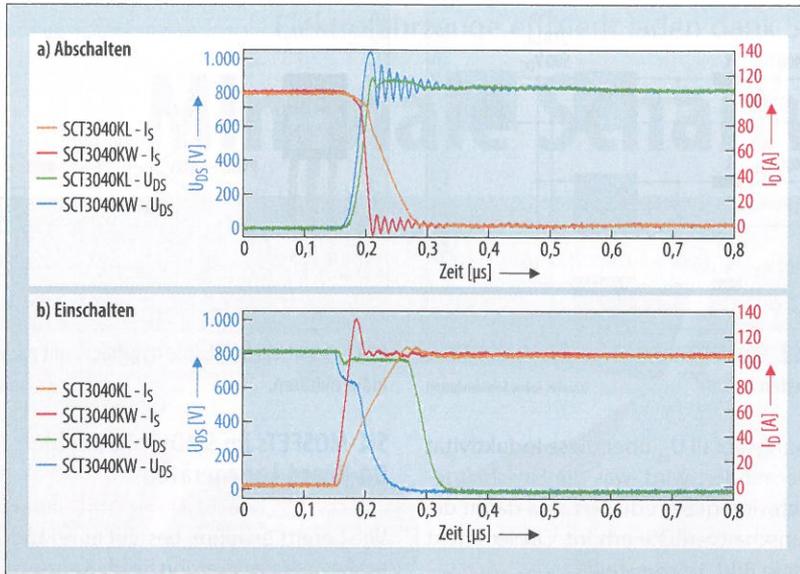


Bild 5. Vergleich des Schaltverhaltens von 40-mQ-1200-V-SiC-MOSFETs (TO-247: SCT3040KL, TO-263-7L: SCT3040KW, 800 V, ca. 110 A).
(Quelle: Rohm Semiconductor)

(SJ-MOSFET) sowie einer SiC-SBD, kombiniert. Die Ansteuerung des SJ-MOSFETs wird so gewählt, dass ein sinusförmiger Strom von der AC-Versorgung bezogen wird. Zur Erreichung von 3,7 kW bietet es sich gegebenenfalls an, diese Topologie in einer Interleaved-Variante mit zwei Induktivitäten sowie zwei SJ-MOSFETs und SiC-SBDs zu realisieren. So lassen sich maximale Wirkungsgrade bis hin zu etwa 98 Prozent erreichen. Eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads ist durch die Leitverluste der 50 Hz Gleichrichterdiode begrenzt. Alternative Topologien wie die zweiphasige, brückenlose PFC und auch die Totem-Pole-PFC haben zum Ziel, den Dioden-Gleichrichter am Eingang zu vermeiden und so bessere Wirkungsgrade realisieren zu können. Mit der zweiphasigen, brückenlosen PFC lässt sich zwar eine gute Performance erreichen, jedoch ist hier von Nachteil, dass jeweils ein Brückenweig lediglich in je einer halben Netzperiode zum Einsatz

kommt. Damit ergibt sich eine relative hohe Belastung durch schnelle Temperaturzyklen bei den Komponenten. Die beiden in Bild 6 gezeigten Varianten der Totem-Pole-PFC stellen eine mögliche Lösung dar, die sich durch das Aufkommen von Wide-Bandgap-Bauelementen wie SiC-MOSFETs wachsender Beliebtheit erfreut. Die Totem-Pole-PFC ist in der Literatur bereits vielfach beschrieben, ihr praktischer Einsatz war aber vor Aufkommen der Wide-Bandgap-Halbleiter auf geringe Leistungen begrenzt, weil die Schaltung nicht mit kontinuierlichem Strom (Continuous Current Mode, CCM) arbeiten konnte. Um das harte Schalten der langsamen Body-Dioden der Si-SJ-MOSFETs zu vermeiden, wurden diese Schaltungen mit diskontinuierlichem Stromfluss (Discontinuous Current Mode, DCM) betrieben, was zu großen Ripple-Strömen führte. Mit Wide-Bandgap-Leistungshalbleitern wie SiC-MOSFETs aber auch GaN-HEMTs ist es nun möglich, die Totem-Pole-PFC

auch mit kleinen Ripple-Strömen im CCM-Betrieb zu betreiben. Dabei kommt der Vorteil der SiC-MOSFETs zum Tragen, dass deren Body-Diode für die harte Kommutierung geeignet ist und nur sehr geringe Reverse-Recovery-Verluste aufweist.

Totem-Pole-PFC mit SiC-MOSFETs

Zum Betrieb einer Totem-Pole-PFC mit kontinuierlichem Drosselstrom sind zwei mit hoher Taktfrequenz zu betreibende Halbleiterschalter mit schnellen Body-Dioden, wie SiC-MOSFETs, als Q1 und Q2 sowie zwei mit Netzfrequenz zu betreibenden Bauelemente, zum Beispiel Si-SJ-MOSFETs, als Q3 und Q4 erforderlich. Es ist denkbar, insbesondere zur Einsparung von Kosten, die Si-SJ-MOSFETs durch zwei Dioden zu ersetzen. In diesem Fall ist mit etwas höheren Durchlassverlusten zu rechnen. Die Silizium-Superjunction-MOSFETs werden mit der Netzfrequenz geschaltet. In der positiven Halbwelle ist Q4 permanent eingeschaltet, wie in Bild 7a dargestellt. So lange der primäre Boost-Schalter Q2 eingeschaltet ist, steigt der Strom in der Eingangsdrossel L_{in} . In dieser Phase wird die Last aus der Zwischenkreis Kapazität versorgt. Beim Ausschalten von Q2 kommutiert der Strom zunächst auf die Body-Diode von Q1. Nach einer kurzen Totzeit wird das Gate von Q1 eingeschaltet, sodass der Kanal des SiC-MOSFETs den Strom übernimmt (Synchrongleichrichtung). Während der negativen Halbwelle der Eingangsspannung tauschen Q1 und Q2 ihre Funktion als primärer Boost-Schalter und Synchrongleichrichter. Außerdem fließt der Strom während der negativen Halbwelle über Q3 während Q4 ausgeschaltet bleibt. Die Strompfade für die negative Halbwelle der Eingangsspannung sind in Bild 7b gezeigt.

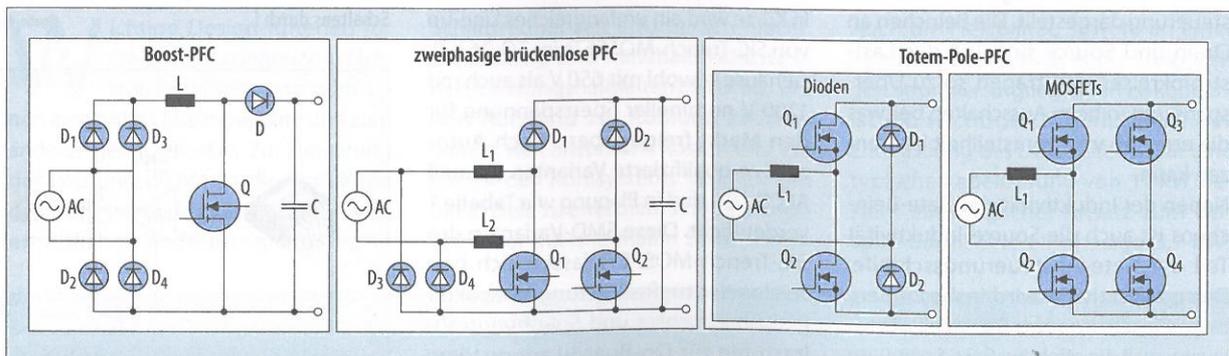


Bild 6. Topologien für einphasige PFC-Gleichrichter.

(Quelle: Rohm Semiconductor)

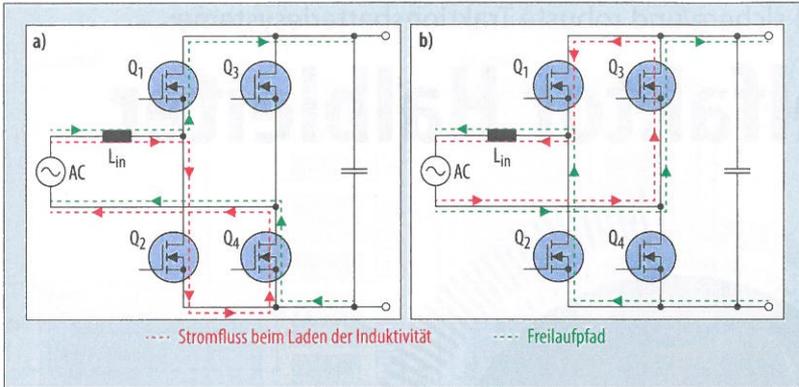


Bild 7. Stromfluss in der Totem-Pole-PFC. a) Stromfluss in der positiven Halbwelle und b) Stromfluss in der negativen Halbwelle.

(Quelle: Rohm Semiconductor)

Aus den Strompfaden ist ersichtlich, dass die Body-Dioden der SiC-MOSFETs hart geschaltet werden. Das ist aber – anders als bei Si-SJ-MOSFETs – nicht problematisch, weil die Body-Dioden der SiC-MOSFETs nur niedrige Recovery-Verluste haben.

Um die Leistung der SiC-MOSFETs in dieser Schaltungsart zu untersuchen, sind die in Bild 7 dargestellte Leistungsstufe sowie weitere zum Betrieb notwendige Funktionsblöcke wie Strom- und Spannungsmessungen, Gate-Treiber und ein Mikrocontroller in einer Testplattform realisiert worden. Weil die Zielsetzung lautete, die Topologie im Zusammenspiel mit SiC-MOSFETs zu testen, stand dabei weniger im Fokus, möglichst Komponenten nah an der Endanwendung auszuwählen, sondern eine hohe Flexibilität als Testplattform zu gewährleisten. Gerade deswegen wurde beispielsweise statt auf einen kostengünstigen Regelungs-IC auf einen flexiblen Mikrocontroller gesetzt. **Bild 8** zeigt die so entwickelte Testplattform.

Auf dieser Testplattform konnten erste Messungen bei Ausgangsleistungen bis zu etwa 2,4 kW durchgeführt werden. Hierbei kamen als schnell taktende

Halbleiter (Q1, Q2) zwei 60-m Ω -650-SiC-Trench-MOSFETs von Rohm (SCT3060AW) sowie für die mit Netzfrequenz schaltende Brücke (Q3, Q4) zwei SJ-MOSFETs zum Einsatz. Bei einer Pulsweitenmodulations-Frequenz von 100 kHz sowie einer Ausgangsspannung von 400 V bei 230 V Eingangsspannung wurden die in **Bild 9** dargestellten Wirkungsgrade erzielt.

Wie anhand der Messergebnisse zu erkennen ist, erreicht bereits diese noch nicht optimierte Hardware eine gute Leistung. Weitere Optimierungen sowohl bei der Gate-Ansteuerung des SiC-MOSFETs als auch in der Komponentenkühlung sind geplant, um zum einen den Wirkungsgrad zu verbessern und zum anderen auch den Leistungsbe- reich auf bis zu 3,7 kW zu erweitern.

Prädestiniert für On-Board-Ladesysteme

Niederinduktive SMD-Gehäuse wie das TO-263-7L ermöglichen es, die elektrische Performance von SiC-Trench-MOSFETs noch besser auszunutzen. Die in Kürze verfügbaren SiC-Trench-MOSFETs in diesem Gehäuse lassen sich zum Beispiel in einer Totem-Pole-PFC ein-

setzen, die als Leistungselektronik zum Beispiel in On-Board-Ladesystemen zum Einsatz kommen kann. Weitere Anwendungsfelder für SiC-MOSFETs im SMD-Gehäuse sind beispielsweise Motorinverter für Klimakompressoren oder Spannungsregler zur Energieübertragung zwischen dem Hochvoltnetz (400/800 V) und dem konventionellen 12-/24-V-Bordnetz. Der Ein-

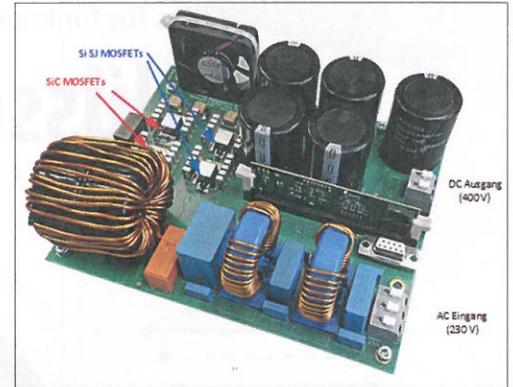


Bild 8. Totem-Pole-PFC-Testplattform.

(Bild: Rohm Semiconductor)

satz der SMD-Technologie hilft dabei, nicht nur die elektrische Leistung der SiC-Halbleiter besser auszunutzen, sondern ermöglicht auch Fertigungskosten zu reduzieren, wenn insgesamt auf bedrahtete Bauteile verzichtet werden kann. *eck*



Dr.-Ing. Christian Felgemacher

studierte von 2006 bis 2011 Elektrotechnik mit Management an der University of Edinburgh in Schottland. Von 2012 an war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE) der Universität Kassel tätig. Dort beschäftigte er sich mit Themen der Zuverlässigkeit von Leistungshalbleitern sowie der Nutzung moderner Wide-Bandgap-Leistungshalbleiter in Konvertern zur Nutzung erneuerbarer Energie und schloss 2018 seine Promotion ab. Seit April 2017 ist er bei Rohm Semiconductor tätig und unterstützt Kunden als Field Application Engineer im Bereich Leistungshalbleiter.



Aly Mashaly

studierte Elektrotechnik an der Universität in Kairo. Das Masterstudium absolvierte er an der Leibniz Universität Hannover. Seine Berufslaufbahn begann er als Entwicklungsingenieur Leistungselektronik bei Liebherr Elektronik. Anschließend übernahm er die Leitung des eMobility-Bereiches bei KEB. Seit Juli 2015 ist er bei Rohm Semiconductor tätig und verantwortet die Power-Systems-Abteilung für den europäischen Markt.

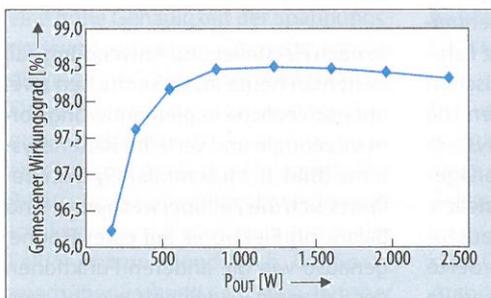


Bild 9. In der Totem-Pole-PFC-Testplattform gemessene Wirkungsgrade ($U_{in} = 230\text{ V}$, $U_{out} = 400\text{ V}$, $f_{sw} = 100\text{ kHz}$, SCT3060AW und Si-SJ-MOSFETs).

(Quelle: Rohm Semiconductor)