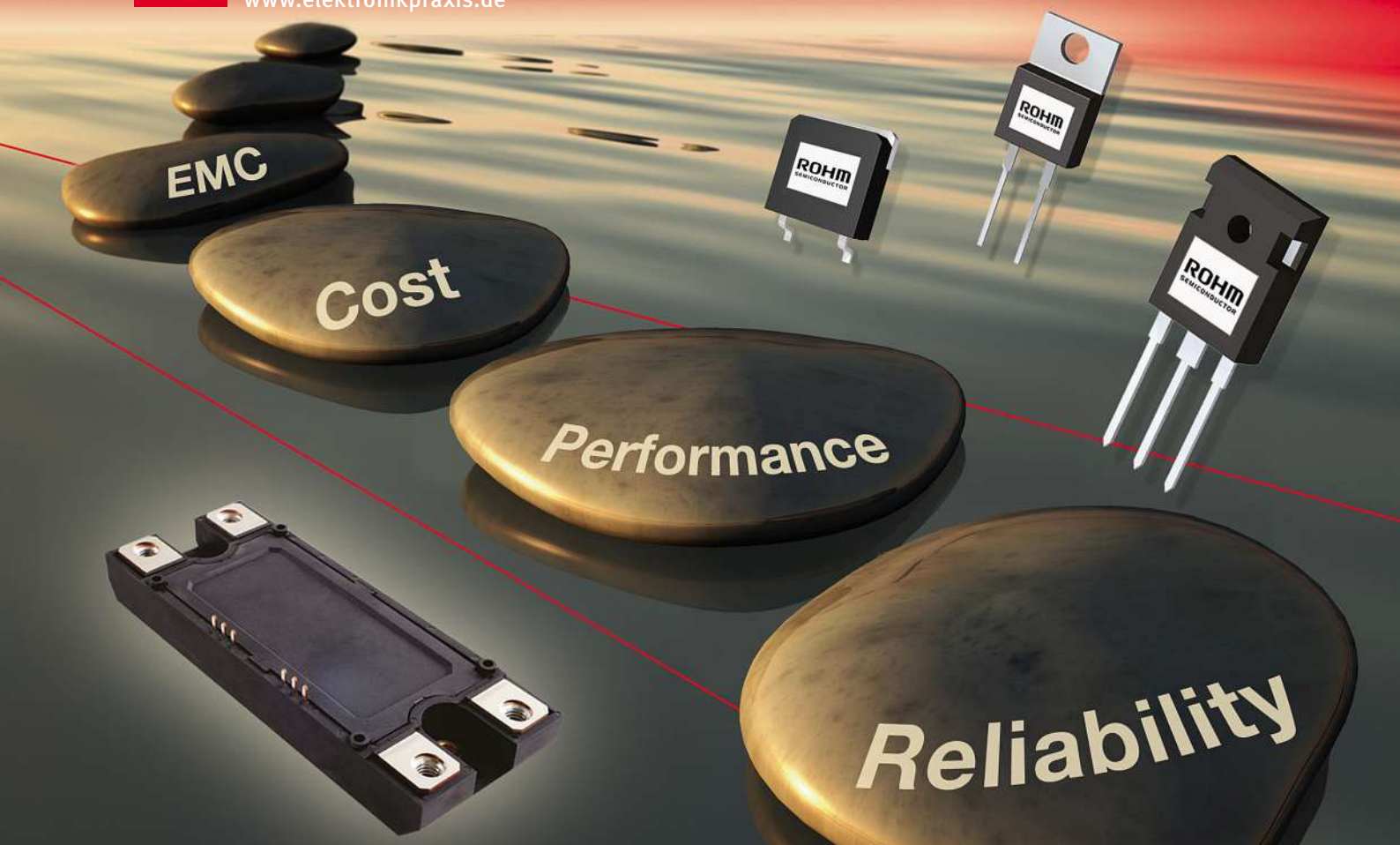
SONDERHEFT LEISTUNGSELEKTRONIK & STROMVERSORGUNG

ELEKTRONIK PRAXIS

Wissen.
Impulse.
Kontakte.

November 2016

www.elektronikpraxis.de



Trittsteine für den Umstieg von Si-IGBT auf SiC-MOSFET

Die Verwendung von SiC-MOSFETs ist durch einige Design-Besonderheiten geprägt. Tipps und technische Hinweise zeigen beispielhaft die Herausforderungen.

Power-Cycle-Tests mit detaillierter Analyse
Thermische Transienten richtig messen und verstehen. **Seite 22**

All-in-One-IPMs für kompakte Frequenzumrichter
Modul-Serie integriert Gleichrichter, Bremssteller und Wechselrichter. **Seite 30**

Industriegeeignete AC-USV für die Tragschiene
Nie wieder auf wenig geeignete Geräte der IT-Welt zugreifen müssen. **Seite 44**

NEU!
Erweitertes EDA-Tool-Angebot zur Beschleunigung Ihres Designprozesses
DIGIKEY.DE/DESIGNTOOLS
Digi-Key ELECTRONICS

Vogel Business Media

KOSTENLOSER VERSAND
FÜR BESTELLUNGEN ÜBER 65 €!
Digi-Key ELECTRONICS
Die weltweit größte Auswahl an elektronischen Komponenten für die sofortige Lieferung!™
Jetzt mehr als 5 Millionen Produkte von über 650 Herstellern
DIGIKEY.DE
*Für alle Bestellungen unter 65,00 € wird eine Versandgebühr von 18,00 € erhoben. Alle Bestellungen die mit UPS versandt werden, haben eine Lieferzeit von 1-3 Tagen (abhängig vom Endbestimmungsort). Keine Bearbeitungsgebühren. Alle Preise verstehen sich in Euro und enthalten Zollgebühren. Bei einem zu grossen Gewicht oder bei unvorhergesehenen Umständen, die eine Abweichung von diesem Tarif erfordern, werden Kunden vor dem Versand der Bestellung kontaktiert. Digi-Key ist ein autorisierter Distributor für alle Lieferpartner. Neue Produkte werden täglich hinzugefügt. © 2016 Digi-Key Electronics, 701 Brooks Ave. South, Thief River Falls, MN 56701, USA

Galliumoxid für Power Devices der nächste Dekade

Glaubt man den Prognosen der Branchenkenner, dann wird Siliziumkarbid (SiC) in Spannungsklassen bis über 10 kV vordringen und Galliumnitrid (GaN) ein enormes Marktpotenzial bis 1000 V erobern. Wenngleich Leistungshalbleiter auf Grundlage von SiC und GaN-on-Si inzwischen zahlreich verfügbar sind, ist ein Massenmarkt eher noch fern. Denn nur zögerlich trauen sich Entwickler, den besonderen Nutzen der Wide Bandgap Devices auszuloten. Weil sich das ändern soll, entdecken Chip-Hersteller in der jungen Formel E des Motorsports ein ideales SiC-Promotionfeld: Für die Automobilindustrie und ihre Elektromobilität werden SiC-Anwendungen, sprich leistungsstarke Inverter, einerseits immer wichtiger, zudem lassen sich Anwendbarkeit und Vorteile von Siliziumkarbid für unterschiedliche Industrien und gesellschaftlich relevante Anwendungen, etwa die Energiewende, in Szene setzen.

Und während die aktuellen Silizium-Alternativen SiC und GaN um Anerkennung ringen, rückt mit Galliumoxid (Ga_2O_3) das nächste vielversprechende Substrat in den Mittelpunk der Fachdiskussionen. Besonders einfach soll das Ziehen eines Einkristalls aus der Schmelze sein. Im japanischen Kyoto konnten Forscher bereits ihre erste SDB (Schottky-Barrier-Diode) aus Ga_2O_3 im TO220-Gehäuse herstellen und testen. Besonders das Schaltverhalten des Ultra-Wide-Bandgap-Prototypen begeisterte, aber auch die thermischen Eigenschaften und die außerordentlich kurze Sperrverzögerungszeit. Damit öffne sich ein Weg zum Galliumoxid-Leistungstransistor in Korundstruktur (α-Ga_2O_3) mit ultraniedrigen Verlusten zu deutlich geringeren Kosten als ein Massenmarkt SiC und GaN anbieten könne, konstatieren die Forscher.

„Die gelungene Entwicklung ihrer ersten SBD mit Ga_2O_3 ermutigt die Forscher zu einer Markteinführung 2018.“

Gerd Kucera, *Redakteur*
gerd.kucera@vogel.de

Zur Konferenz der Leitmesse PCIM 2017 in Nürnberg planen deutsche Experten das Thema Galliumoxid in einer breiteren Öffentlichkeit als bislang zu diskutieren. Bis dahin finden Sie im vorliegenden Sonderheft Tipps zum bestmöglichen Einsatz von aktuellen SiC und GaN Devices.

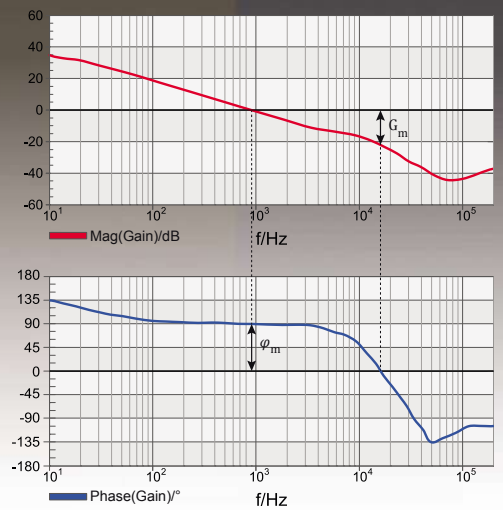
Herzlichst, Ihr

OMICRON LAB

Hohe Qualität, Fairer Preis

Ingenieure in über 50 Ländern vertrauen auf den vektoriellen **Netzwerkanalysator Bode 100**. Denn das Bode 100 bietet **präzise** Messergebnisse, einfachste Bedienung und ein **unschlagbares** Preis-Leistungsverhältnis.

Messen Sie von 1 Hz bis 40 MHz:
- Regelkreisstabilität
- Eingangs- & Ausgangsimpedanz
- Bauteilimpedanzen
- EMV Filtereigenschaften



Erleben Sie das Bode 100 live!
www.omicron-lab.com/lab

Smart Measurement Solutions®

INHALT

LEISTUNGSELEKTRONIK

Trittsteine für den Umstieg von Si-IGBT auf SiC-MOSFET

SiC-MOSFETs haben das erforderliche Qualitätsniveau erreicht, was standardmäßige Qualifikationsprozesse und Tests der Gate-Oxid- Lebensdauer belegen. Darüber hinaus besitzen SiC-MOSFETs eine verbesserte Beständigkeit gegen Phänomene wie etwa kosmische Strahlung. In zahlreichen Anwendungen sind auch die von SiC-MOSFETs bewirkten wirtschaftlichen Vorteile nachgewiesen, unter Berücksichtigung der noch heute bestehenden Preisdifferenz auf Bauteilebene.

11

SCHWERPUNKT

Leistungselektronik

TITELTHEMA

11 **Tipps für den Umstieg von Si-IGBT auf SiC-MOSFET**
Damit die Vorteile von SiC-Devices sicher zum Tragen kommen, sind möglicherweise Änderungen am System-Design notwendig. Tipps und technische Hinweise zeigen beispielhaft die Herausforderungen.

16 **Siliziumkarbid-Technik hält Einzug in der Formel E**
Die Hochtemperatureignung bis 300 °C ist eine der besonderen Stärken von SiC-Halbleitern. Ideal für etwa die Elektromobilität, die hohe Leistungsdichte, Kompaktheit und Zuverlässigkeit verlangt.

18 **SiC als Alternative zu Silizium und Galliumnitrid**
Warum SiC-Bausteine in leistungselektronischen Designs die bessere Alternative zu Silizium und Galliumnitrid sind, skizziert der Artikel am Beispiel eines Resonanzwandlers.

22 **Power-Cycle-Testes mit detaillierter Analyse**
Die Analyse von Lastwechseltests und Ausfallmechanismen sowie das Abschätzen der Lebensdauer sind Inhalt dieses Artikels. Er zeigt die praktische Anwendung der thermischen Transienten-Messung.

26 **Thermische Charakterisierung von Systemen**
Die thermische Optimierung erfordert eine präzise Analyse der Wärmepfade. Bauchgefühl und Erfahrung reichen aufgrund gestiegener Systemkomplexität nicht mehr aus.

30 **DIPIPM+-Modul-Baureihe für Kompakt-Umrichter**
Alle IPMs der neuen DIPIPM+-Baureihe integrieren Gleichrichter, Bremssteller und Wechselrichter. Optimierte IGBT- und FWDi-Chips mit HV- und NV-ICs sind auf einem gemeinsamen Leadframe assembliert.

Stromversorgung

36 **Integrierte Kühlkörper für Leistungshalbleiter**
In diesem Artikel werden drei Wege verglichen, wie sich beliebig geformte Kühlkörper-Geometrien optimieren lassen.

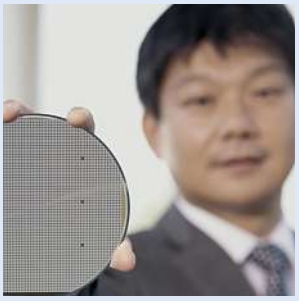
40 **Meilensteine – vom Selen zum Siliziumkarbid**
Fundamente der Elektronik: Georg Simon Ohm erkannte 1821 die Proportionalität von Strom, Widerstand und Spannung; Jöns Jakob Berzelius entdeckte 1818 das Selen, 1823 Silizium und 1824 Tantal.

44 **Industriegerechte AC-USV für die Tragschiene**
Wer unter Industriebedingungen AC-Verbraucher per USV absichern will, muss nicht auf Geräte der IT-Welt zugreifen.

47 **Buck/Boost-Regler mit 97% Wirkungsgrad**
Zum Einsatz im Kfz mit zwei Batterien (48-V- und 12-V-Bordnetz), etwa im Hybrid-Elektro- und Mild-Hybrid-Fahrzeug, sorgt der Synchron-Abwärts-/Aufwärtsregler für eine erhöhte Ausgangsleistung.

48 **Die Lebensdauer von Stromversorgungen**
Wie langlebig ist eine Stromversorgung unter gegebenen Einsatzbedingungen? Die Antwort findet sich nicht einfach als Zahlenwert in den Spezifikationen der Hersteller.

6 *Erster 1000-V-MOSFET in Siliziumkarbid*



16 *Siliziumkarbid hält Einzug in der Formel E*

44 *Industrie-AC-USV für die Tragschienenmontage*

48 *Die Lebensdauer von Stromversorgungen*

52 **Netzgeräte sorgen für ein effizienteres IoT**
Neueste Netzgeräte, die den Level-VI-Anforderungen des US-Energieministeriums entsprechen, erhöhen den Wirkungsgrad netzabhängiger IoT-Gateways. Hier erfahren Sie, warum das so ist.

RUBRIKEN

3 **Editorial**

PRAXIS FORUM Elektrische Antriebstechnik

Praxisforum Elektrische Antriebstechnik
4. bis 6. April 2017, Würzburg
Renommierte Referenten aus Wissenschaft und Industrie vermitteln Grundlagen, komplexes interdisziplinäres Wissen und aktuelle Erkenntnisse.
www.praxisforum-antriebstechnik.de

HY-LINE® POWER COMPONENTS

Power im Fokus

Leistungselektronik Stromversorgung

- IGBT Module
- IGBT Treiber
- GaN Technologie
- Stromversorgungen
- DC/DC Wandlermodule
- Induktivitäten
- Superkondensatoren

HY-LINE Power Components Vertriebs GmbH
Inselkammerstr. 10 · D-82008 Unterhaching
Tel.: 089/614503-10 · E-Mail: power@hy-line.de

Schweiz: Hochstrasse 355 · CH-8200 Schaffhausen
Tel.: 052 647 42 00 · E-Mail: power@hy-line.ch

www.hy-line.de/power

artpool.de / A10650

POWER-MOSFET

Industrieerster 1000-V-MOSFET in Siliziumkarbid für Batterie-Lader

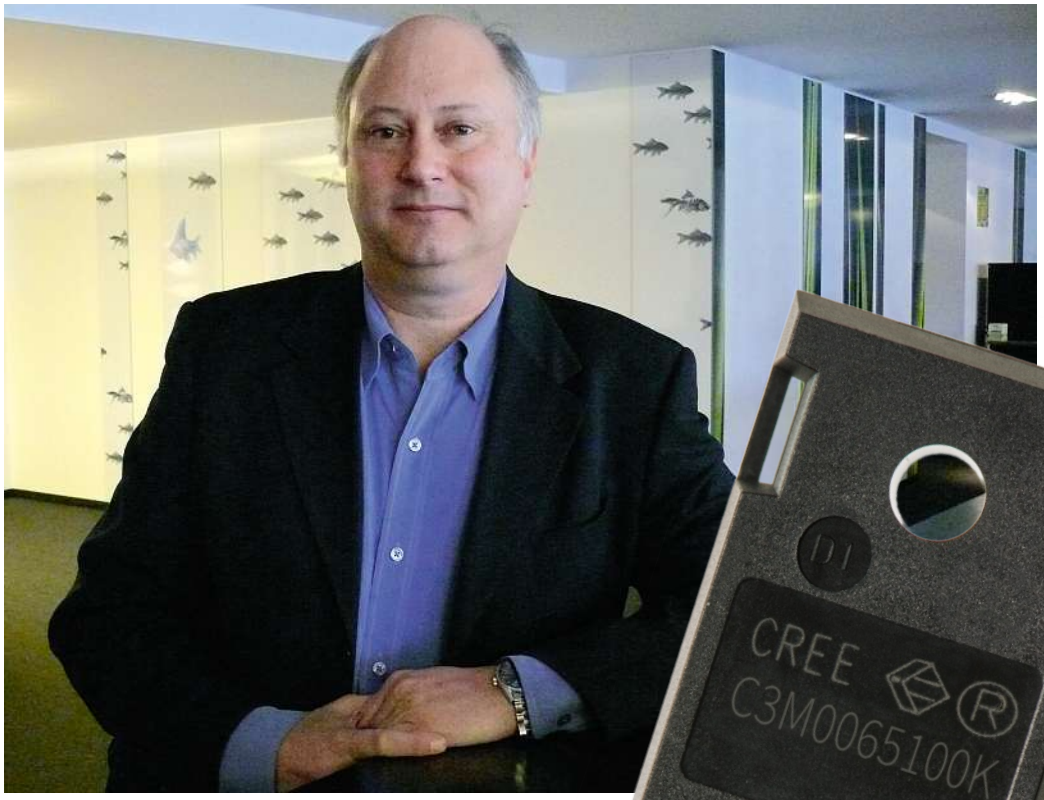


Bild: Gerd Kucera

John Palmour, CTO Wolfspeed: *„Oberflächenmontierte Versionen dieser Halbleiter (C3M0065100J und C3M0120100J) sollen bis zum Jahresende zur Verfügung stehen."*

Ein industrieerster SiC-MOSFET für 1000 V Sperrspannung ist von Wolfspeed speziell zum Einsatz in schnellen Batterieladern sowie industriellen Stromversorgungslösungen entwickelt und optimiert worden. Mit ihm lässt sich laut Hersteller die Leistungsdichte verdreifachen und die Ausgangsleistung um 33 Prozent steigern.

„Unsere Technologien ermöglichen kleinere und effizientere Ladesysteme mit höherer Stromladung – und das bei niedrigeren Gesamtkosten", konstatiert John Palmour, Chief Technical Officer bei Wolfspeed, „der Markt für externe Ladestationen benötigt Lösungen mit hoher Effizienz sowie einem breiten Ausgangsspannungsbereich, um den Anforderungen der Batteriespannungen von Elektrofahrzeugen unterschiedlicher Automobilhersteller gerecht zu werden. Mit dem 1000-V-SiC-MOSFET sind außerordentlich schnelle Umschaltgeschwindigkeiten mit nur einem Bruchteil der bei Silizium-basierten MOSFETS üblichen Schaltverluste möglich."

Nach Herstellerangaben können Entwickler die Komponentenzahl bis zu 30% reduzieren, indem sie mit Hilfe des 1000-V_{ds}-Ratings des neuen SiC-MOSFETs von Silizium-basierten Drei-Level-Topologien auf eine einfachere Zwei-Level-Topologie wechseln. Die Erhöhung der Ausgangsleistung bei geringerem Footprint wird durch die sehr niedrige Ausgangskapazität (60 pF) ermöglicht, was Schaltverluste signifikant reduziert. Der 1000-V-SiC-MOSFET ermöglicht zudem den Betrieb bei höheren Schaltfrequenzen, was die Größe der Induktivität verringert und die Gesamtverluste reduziert. Mit dem Ergebnis, dass wiederum weniger Kühlkörper verbaut werden müssen.

Zur Design-Unterstützung gibt es von Wolfspeed einen 20-kW-Vollbrücken-LLC-Resonanz-Wandler als Referenz unter der Artikelnummer CRD-20DD09P-2. Dieses vollständig montierte Hardware-Set ermögliche es, den neuen 1000-V-SiC-MOSFET schnell bewerten zu können; es verdeutlicht die schnellere Schaltfähigkeit ebenso wie die erhöhte Leistungsdichte.

Alle Daten des LLC-Wandler-Referenz-Designs beinhalten neben den vollständigen Schaltplänen auch eine Aufzählung der verwendeten Materialien, Simulations-Dateien sowie ein detailliertes Benutzerhandbuch. Die Unterlagen lassen sich unter http://www.go.wolfspeed.com/reference-designs herunterladen. Auf Anfrage ist die gesamte Hardware bei Wolfspeed erhältlich.

Der On-Widerstand des 1000-V-MOSFET im 4L-TO247-Gehäuse beträgt 65 mΩ. Erhältlich ist der SiC-Baustein unter der Artikelnummer C3M0065100K bei Digikey, Mouser und Richardson RFPD. Wolfspeed plant die Markteinführung eines weiteren 1000-V-MOSFET im 4L-TO247-Gehäuse mit 120 mΩ Durchlasswiderstand (C3M0120100K) in Kürze. Das Gehäuse hat einen Kelvin-Source-Anschluss, der Designs ermöglicht, die die Vorteile von SiC in Hinblick auf Geschwindigkeit und Effizienz bestmöglich nutzen. Oberflächenmontierte Versionen dieser Halbleiter (C3M0065100J und C3M0120100J) sollen bis zum Jahresende zur Verfügung stehen. Wie das 4L-TO247-Gehäuse, werden auch die oberflächenmontierten Verionen über einen Kelvin-Source-Pin verfügen, um das Gate Ringing und die Systemverluste zu reduzieren.

Mit Markteinführung seines 1000-V-SiC-MOSFETs verfügt Wolfspeed nach eigenen Angaben über das industrieweit breiteste Bausteinportfolio. Das Unternehmen war 2011 das erste, welches einen kommerziell geeigneten SiC-MOSFET auf den Markt gebracht hat.

Wolfspeed

Hier finden Sie einfach alles

- DATENBLÄTTER
- ANWENDUNGSHINWEISE
- ARTIKEL
- NEUE PRODUKTE
- TECHNISCHE LEITFÄDEN
- SCHALTPLÄNE
- REFERENZDESIGNS
- SYMBOLE UND FOOTPRINTS
- TEILESUCHE
- ENTWICKLUNGSKITS
- EVALUIERUNGSKARTEN
- TECHNISCHE UNTERSTÜTZUNG
- PRODUKTSCHULUNGSMODULE

Digi-Key® ELECTRONICS

TELEFON: 0800 180 01 25

DIGIKEY.DE

5 MILLIONEN TEILE ONLINE | ÜBER 650 LIEFERANTEN | 100 % AUTORISIERTER DISTRIBUTOR

*Für alle Bestellungen unter 65,00 € wird eine Versandgebühr von 18,00 € erhoben. Alle Bestellungen die mit UPS versandt werden, haben eine Lieferzeit von 1-3 Tagen (abhängig vom Endbestimmungsort). Keine Bearbeitungsgebühren. Alle Preise verstehen sich in Euro und enthalten Zollgebühren. Bei einem zu grossen Gewicht oder bei unvorhergesehenen Umständen, die eine Abweichung von diesem Tarif erfordern, werden Kunden vor dem Versand der Bestellung kontaktiert. Digi-Key ist ein autorisierter Distributor für alle Lieferpartner. Neue Produkte werden täglich hinzugefügt. © 2016 Digi-Key Electronics, 701 Brooks Ave. South, Thief River Falls, MN 56701, USA

ecia MEMBER ecsn member CEDA

ISOLIERENDE 400-W-AC/DC-WANDLER

Mit PFC und EMV-Filter in superflachen Gehäusen

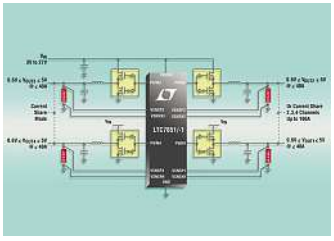
Das Gerät ist fertig entwickelt, doch der Platz und die Entwicklungszeit für die Stromversorgung fehlt? Kein Problem mit den bei HY-LINE Power Components erhältlichen VIA-AC/DC-Wandlern und Filtern: Diese können mit weniger als 10 mm Dicke auch auf Rückwand oder andere Chassisteile montiert werden und sind die perfekte Lösung beispielsweise in LED-Beamern, Telecom-Kleinzellen, Industrie- und Prozesssteuerkonsolen sowie hochwertigen Test- und Messgeräten. Das VIA PFM, ein isolierender AC/DC-Wandler mit PFC, ist eine sehr kompakte, isolierende AC/DC-Stromversorgungslösung mit weniger als 9,5 mm Dicke. Das Modul nutzt aktive Power Factor Correction (PFC) und arbeitet über einen weiten Eingangsspannungsbereich von 85 bis 264 V_{AC}. Es liefert einen geregelten und isolierten 24- oder 48-V-SELV-DC-Ausgang (Safety Extra Low Voltage) zur Bus-Versorgung mit einer Leistung von bis zu 400 W und ist gegen Unterspannung, Überspannung, Überstrom und Kurzschluss geschützt. Gleichrichtung und EMV-Filterung nach EN55022 Klasse B liefert mit dem VIA AIM wahlweise ein zweites Modul oder eine diskrete Lösung. Weitere Betriebsspannungen lassen sich ebenso effizient mit noch kompakteren DC/DC- und POL-Wandlern gewinnen. Der hohe Wirkungsgrad (92% bei 24 V-Ausgang) des Moduls und das thermisch effektive VIA-Gehäuse erleichtern das Wärmemanagement in der Stromversorgung. Der Betrieb ist von –40 bis 100 °C möglich. Das beidseitig kühlbare Gehäuse mit den Maßen 110,6 mm oder 124,8 mm x 35,5 mm x 9,3 mm kann sowohl auf Chassis als auch direkt auf eine Platine montiert werden.

HY-LINE Power Components

DC/DC-WANDLER

Mehrphasen-Abwärtsreglercontroller mit vier Ausgängen

Linear Technology hat den LTC7851/-1 vorgestellt, einen Mehrphasen-DC/DC-Synchron-Abwärtsreglercontroller mit vier Ausgängen, gleichmäßiger Stromaufteilung zwischen den Phasen und differenzieller Ausgangsspannungserfassung. Der Controller kann sowohl DrMOS-Module und Power Blocks als auch Leistungsstufen auf der Basis diskreter n-Kanal-MOSFETs und Gate-Treiber steuern. Unter Verwendung von zwei Controllern dieses Typs können bis zu acht Phasen parallelgeschaltet und gegeneinander versetzt getaktet werden, um die Anforderungen an die Eingangs- und Ausgangsfilter in Hochstromanwendungen bis 260 A zu verringern. Der Stromverteilungsregler im LTC7851/-1 teilt den Strom im Parallelschaltungsbetrieb gleichmäßig zwischen den Phasen auf, auch über mehrere ICs hinweg. Das gilt sowohl für stationäre Ströme als auch für Transienten. Der Controller benötigt eine Betriebsspannung (V_{CC}) von 3 bis 5,5 V, ist dafür ausgelegt, Spannungen



zwischen 3 und 27 V herunterzuregeln und liefert bis zu vier voneinander unabhängige Spannungen von 0,6 bis 5 V. Die Schaltfrequenz des auf einer Voltage-Mode-Regelungsarchitektur basierenden Controllers kann auf einen festen Wert zwischen 250 kHz und 2,25 MHz eingestellt oder mit einem externen Taktsignal innerhalb dieses Frequenzbereichs synchronisiert werden. Alle Kanäle bieten Ausgangsstromüberwachung, einstellbare Strombegrenzung, programmierbare Soft-Start- oder Tracking-Funktion sowie Power-good-Signal. Die Referenzspannungsgenauigkeit beträgt ±0,75% über den Betriebstemperaturbereich von –20 bis 85 °C.

Linear Technology

Rittal – Das System.

Schneller – besser – überall.

Besuchen Sie uns:
SPS IPC Drives in Nürnberg
Rittal: Halle 5, Stand 111
Eplan: Halle 6, Stand 210

Unsere Kompetenz.
Ihr Nutzen.

SCHALTSCHRÄNKE | STROMVERTEILUNG | KLIMATISIERUNG

FRIEDHELM LOH GROUP

STECKERNETZTEILE

Mit integriertem USB-Anschluss

CUI hat AC/DC-Steckernetzteile mit integriertem USB-Anschluss vorgestellt, die den Standards nach DoE Level VI und CoC Tier 2 entsprechen. Die 10-Watt-Netzteile SMI10-USB, SWI10-N-USB und SWI10-E-USB erfüllen die strengen Anforderungen hinsichtlich des durchschnittlichen Wirkungsgrads und im Leerlauf, wie sie vom amerikanischen Energieministerium (DOE; Department of Energy) im Februar 2016 verabschiedet wurden. Jeder nationale oder internationale Hersteller, der seine Endprodukte mit einem externen Netzteil in den USA verkaufen möchte, muss nun diese neuen Standards nach Level VI erfüllen. Damit soll der Stromverbrauch verringert werden, sobald das Endgerät nicht in Betrieb ist oder nicht länger mit dem System verbunden ist. Die Netzteile erfüllen auch die ab Januar 2018 gültige CoC-Tier-2-Richtlinie der Europäischen Union, die den Stromverbrauch bei 10% Last weiter begrenzt. Die kompakten Steckernetzteile haben die Maße 51,5 mm x 38,5 mm x 23,5 mm. Mit Steckern für Nordamerika und Japan bietet das SWI10-N-USB die Sicherheitszulassungen nach UL/cUL und PSE, während das SWI10-E-USB mit EU-Stecker die Sicherheitszulassungen nach CE und GS bietet. Das SMI10-USB ist für den weltweiten Einsatz konzipiert und bietet wechselbare AC-Stecker für Nordamerika, Europa, Großbritannien, Australien und China. Schutz gegen Überspannung, Überstrom und Kurzschluss ist ebenfalls integriert. Alle drei Modelle erfüllen die

Klasse-B-Grenzwerte für leitungsgebundene und abgestrahlte Störungen und eigenen sich für verschiedenste Consumer-Anwendungen.

CUI

LADESYSTEME

Zum Laden von Bleiakkumulatoren

Der Akkutec SVC (Special Voltage Charger) von J. Schneider Elektrotechnik ist ein Ladegerät für Bleiakkus, an das bis zu 32 12-Volt-Blöcke angeschlossen werden können. Als Minimum sind 5 Blöcke mit einer Gesamtspannung von 60 V vordefiniert. Dazwischen gibt es noch jeweils eine Variante mit 72 V, 110 V, 220 V und 366 V. Geladen wird temperaturgeführt. Mit der PC-Software paraTEC-UCC kann eine beliebige Anzahl an Akkumulatoren eingestellt werden und der Lader lässt sich parametrieren

sowie im Betrieb zu überwachen. Die Pufferzeit ist abhängig vom Ladezustand der Akkus und vom Entladestrom.

J. Schneider Elektrotechnik

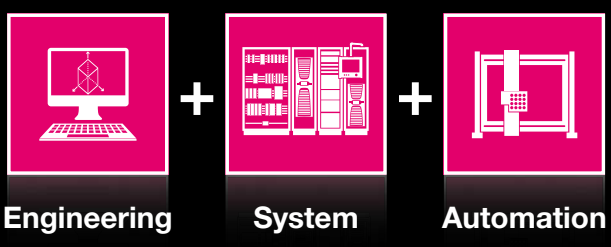
NETZTEILE

Medizinisch zuverlässig

Eine zuverlässige Stromversorgung ist das Rückgrat jedes medizinischen Gerätes. Medizinische Systemhersteller setzen deshalb auf erfahrene Spezialisten wie inpotron. So hat eine von inpotron entwickelte OP-LED-Beleuchtung z.B. einen Wirkungsgrad von 94%. Weitere Beispiele sind Entwicklungen für die Notfallmedizin, Stromversorgungen für die Patientenbeobachtung und besonders robuste Ladegeräte für medizinische Einsatzfälle. inpotron hat sich als Spezialist für medizinische Einsatzfälle von Stromversorgungen einen Namen gemacht und berät, plant und produziert individuell zugeschnittene und maßgefertigte Stromversorgungen. Egal wie speziell, egal wie ausgefallen, egal wie individuell diese auch sind, inpotron erarbeitet und entwickelt das passende Konzept. Grundlage für die erfolgreiche Zusammenarbeit sind besondere Systemkonzepte und die Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten.

inpotron

Steuerungsbau 4.0



Erleben Sie live Lösungen für die lückenlose, integrierte Wertschöpfungskette im Steuerungs- und Schaltanlagenbau. **Sichern Sie sich Ihren Wettbewerbsvorsprung und setzen Sie auf das Leistungsnetzwerk der Zukunft für Industrie 4.0.**

IT-INFRASTRUKTUR SOFTWARE & SERVICE

RITTAL

www.rittal.de

TITELSTORY

SiC-MOSFETs haben das für die meisten industriellen Anwendungen erforderliche Qualitätsniveau erreicht, was standardmäßige Qualifikationsprozesse und Tests der Gate-Oxid-Lebensdauer belegen. Darüber hinaus besitzen SiC-MOSFETs eine verbesserte Beständigkeit gegen Phänomene wie etwa kosmische Strahlung. In zahlreichen Anwendungen sind auch die von SiC-MOSFETs bewirkten wirtschaftlichen Vorteile nachgewiesen, unter Berücksichtigung der noch heute bestehenden Preisdifferenz auf Bauteilebene. Schon bald werden durch die Anhebung der Wafer-Größe und auch aufgrund von Skaleneffekten die Preise von SiC-Bauelementen sinken.

Trittsteine für den Umstieg von Si-IGBT auf SiC-MOSFET

Damit die Vorteile von SiC-Devices sicher zum Tragen kommen, sind möglicherweise Änderungen am System-Design notwendig. Tipps und Technikhinweise zeigen beispielhaft die Herausforderungen.

VLADIMIR SCARPA *

Die Eigenschaften und Vorteile von Siliziumkarbid (SiC) wurden mittlerweile umfassend demonstriert. SiC hat den Beweis erbracht, dass es das geeignete Material für Leistungsschalter im Hochspannungs- und Hochfrequenzbereich ist. Wie Bild 1 zeigt, wurden in den letzten Jahren bereits zahlreiche Bauelemente auf SiC-Basis vorgestellt. Mittlerweile sind einige Produkte auch schon mit bedeutenden Verbesserungen in der zweiten oder gar dritten Generation im Markt eingeführt worden.

Zunächst, d.h. in den frühen 2000er Jahren, wurden mit Schottky-Barrier-Dioden (SBD) die ersten SiC-Bausteine implementiert, die in großem Umfang in den Leistungsfaktor-Korrekturstufen (PFC) einphasiger Schaltnetzteile (SMPS) eingesetzt wurden. Mit ihrer sehr geringen Sperrverzögerungsladung reduzierten sie die dynamischen Verluste in der Diode selbst und im kommutierenden Schalter erheblich. Seit einiger Zeit kommen SiC-SBDs auch in weiteren Anwendungen wie etwa PV-Wechselrichtern und unterbrechungsfreien Stromversorgungen zum Einsatz.

Was die aktiven Schalter betrifft, kamen im Jahr 2010 die ersten selbstsperrenden SiC-Schaltbausteine auf Basis einer MOSFET-Struktur auf den Markt. Diese Bauelemente vereinfachten die Gate-Treiber-Schaltung und ermöglichten eine reibungslosere Umstellung von standardmäßigen Silizium-IGBTs und Superjunction-MOSFETs. Als Konsequenz hieraus fassten mehrere Elektronikunternehmen, meistens aus industriellen Anwendungsgebieten, die SiC-Schalter als kurzfristiges Ziel ins Auge und starteten Entwicklungsprojekte mit SiC-MOSFETs. Nach gründlichen Qualifikations-Verfahren auf der Systemebene gingen aus einem Teil dieser Projekte kürzlich reale Produkte hervor, die dann in den praktischen Einsatz gelangten.

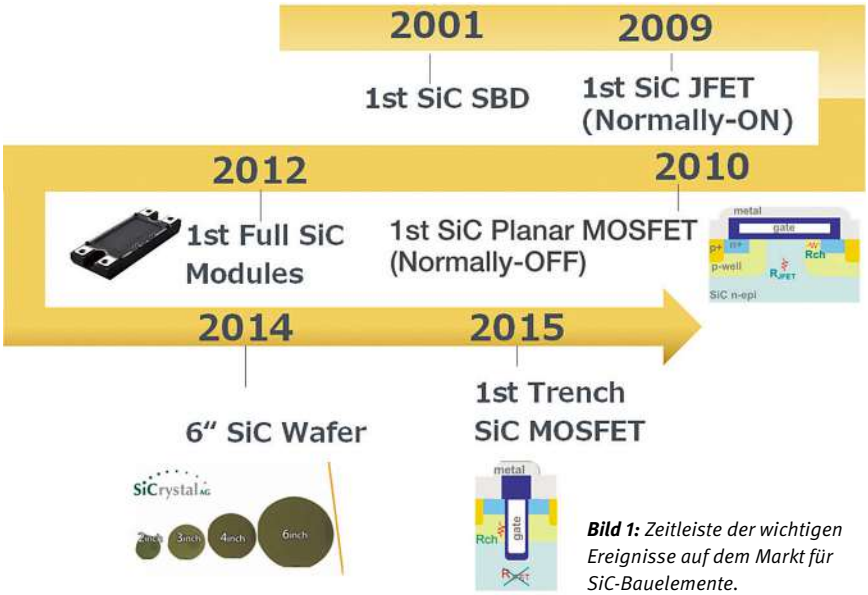


Bild 1: *Zeitleiste der wichtigen Ereignisse auf dem Markt für SiC-Bauelemente.*

Bilder: ROHM Semiconductor

Allerdings ist die Umstellung auf SiC-MOSFETs durch einige Besonderheiten geprägt. Damit die Vorteile dieser Bauelemente maximal und sicher zum Tragen kommen können, sind möglicherweise bestimmte Änderungen am Systemdesign notwendig. In diesem Artikel geht es um einige der Herausforderungen, die sich vor und während der Entwicklungsphase ergeben. Es werden technische Hinweise gegeben und in einigen Fällen wird anhand praktischer Beispiele gezeigt, wie sich diese Anforderungen lösen lassen.

Zu den wichtigsten Aspekten für Entwicklungsingenieure gehört die Zuverlässigkeit von SiC-Bauelementen. Dies ist durchaus verständlich, denn mit SiC konnte man bisher noch nicht dieselben Erfahrungen sammeln wie mit entsprechenden IGBTs und MOSFETs in Silizium. Wie der Tabelle (Bild 7) zu entnehmen ist, basieren die Qualifikationsprozesse für Silizium- und SiC-Bauelemente auf gleichen Prüfbedingungen.

ROHM führt verschiedene weitere Tests durch, um die Qualität und die Lebensdauer ihrer Produkte zu gewährleisten. Ergebnisse aus diesen Tests können nach Kundenanfrage direkt mitgeteilt werden. Zusätzlich sind weitere Tests, auch außerhalb der Normen, nach Absprache von ROHM Semiconductor durchführbar.

Die Lebensdauer der Gate-Oxid-Schicht

Wie Bild 1 zeigt, führte ROHM unlängst die dritte Generation seiner SiC-MOSFETs ein. Es handelt sich dabei um die ersten Bausteine mit Trench-Gate im Unterschied zu den Planar-Gate-Versionen der vorherigen Generationen. Bei dieser neuen Struktur fällt der

*** Dr. Vladimir Scarpa**
... ist Application Engineer Power bei ROHM Semicondcutor in Willich.

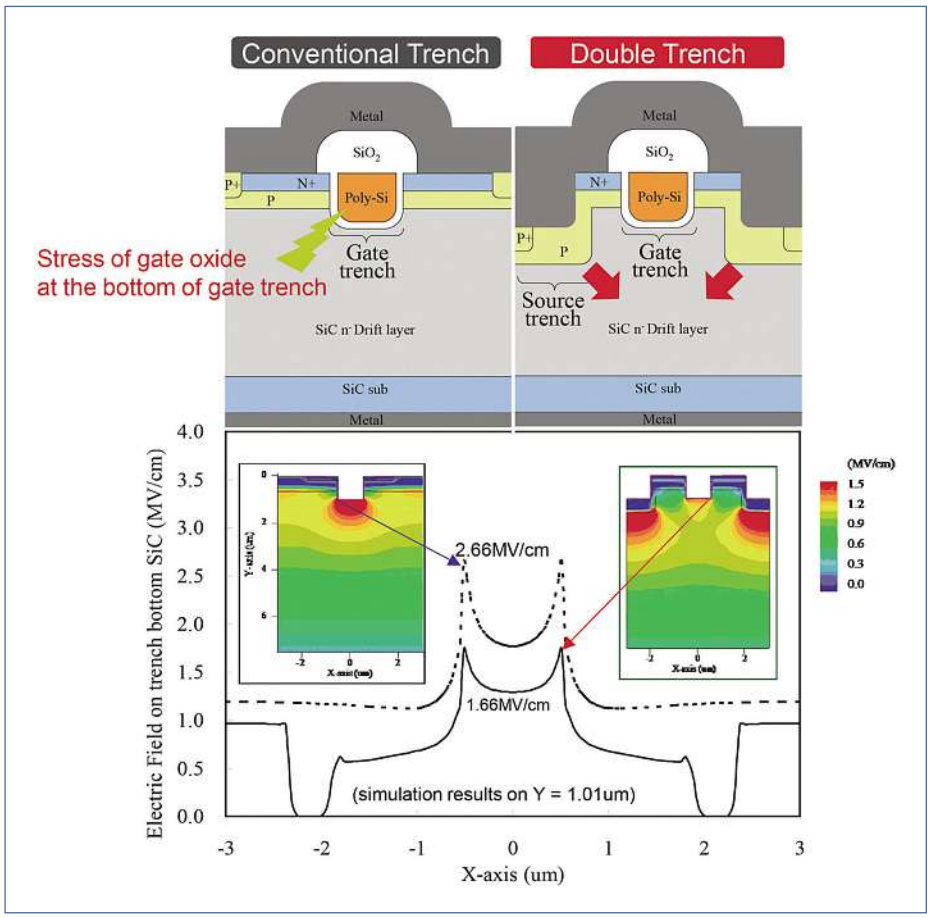


Bild 2: *Doppelte Trench-Struktur und simuliertes elektrisches Feld im Vergleich zur konventionellen Trench-Struktur.*

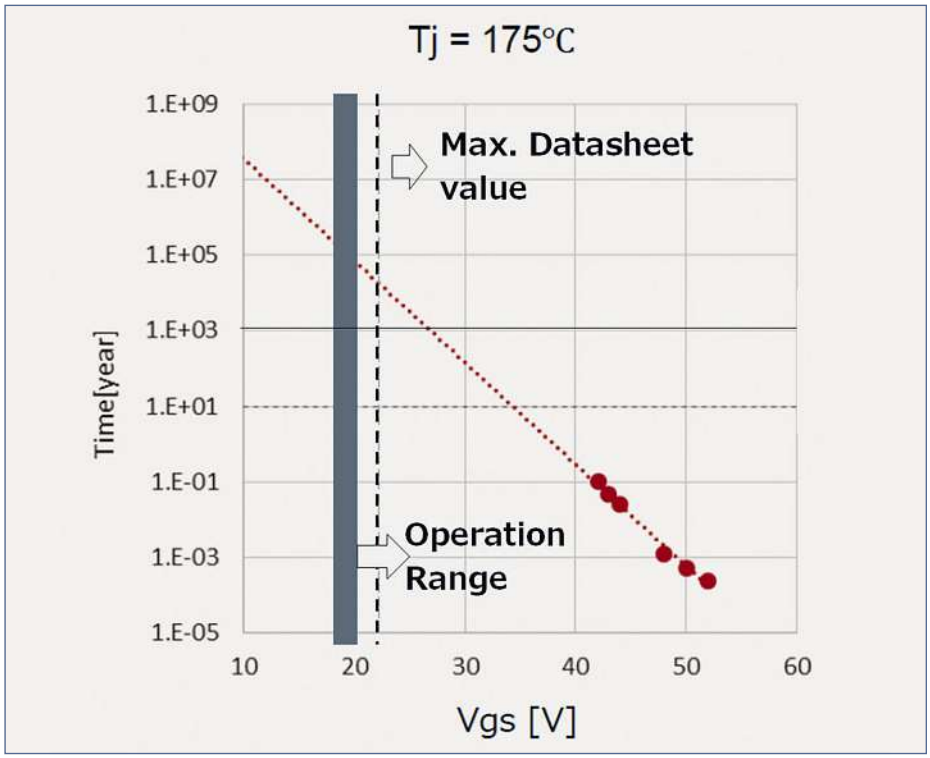


Bild 3: *Beschleunigungstests 3rd-Gen-SiC-MOSFET von ROHM und entsprechende Extrapolation der Lebensdauer des Gate-Oxides.*

Widerstand des parasitären JFET innerhalb der Struktur praktisch weg. Die Folge ist eine Halbierung des (auf die Fläche umgerechneten) spezifischen Einschaltwiderstands [2].

Bild 2 verdeutlicht die von ROHM verwendete Trench-Struktur (auch als U-Struktur bezeichnet). Wie man sieht, ist das elektrische Feld in der Umgebung der Grenzschicht zwischen SiC und SiO_2 im gesperrten Zustand deutlich schwächer als bei der konventionellen Struktur. Dies bürgt für eine lange Gate-Oxid-Lebensdauer auch bei Betriebsspannungen, die in der Nähe der Nennspannung liegen.

Um den SiC-MOSFET einzuschalten, wird eine Spannung zwischen Gate und Source angelegt. Es ist möglich, die Lebensdauer des Gateoxides durch einen Beschleunigungstest einzuschätzen, mit entsprechend hohen Spannungen am Gate. Aus einer bestimmten Anzahl von Messpunkten kann die Lebensdauer bis auf typische Gate-Spannungswerte extrapoliert werden (siehe Bild 3). Für die dritte Generation der SiC-MOSFETs von ROHM ist die eingeschätzte Lebensdauer viel länger als die typischen Anforderungen der industriellen Anwendungen.

Die Beständigkeit gegen weitere Ereignisse wie Kurzschlüsse und Avalanche-Durchbrüche wurde in Labortests von ROHM nachgewiesen. Die Definition von Parametern wie Kurzschlussfestigkeit (Short-Circuit Withstand Time – SCWT) und Avalanche-Energie sind in Vorbereitung.

In der Zwischenzeit sollten Kurzschluss- und Avalanche-Vorfälle in Systemebene vermieden werden. Solche Lösungen werden heutzutage bei dem Einsatz von IGBTs bereits berücksichtigt, da diese Bauteile keine Avalanche-Beständigkeit garantieren können. Außerdem, haben neue Ultrafast-Silizium-IGBTs keine oder sehr kleine Kurzschlussfestigkeit. Trotzdem sind sie häufig in industriellen Anwendungen anzutreffen.

Beständigkeit gegen kosmische Strahlung

Das Phänomen der kosmischen Strahlung ist in der Literatur umfassend beschrieben [3]. Es kann ein kritischer Aspekt insbesondere für solche Anwendungen sein, deren Betriebsspannung sehr nah an der Nennspannung des Schalters liegt. Dies trifft beispielsweise für PV-Wechselrichter und unterbrechungsfreie Stromversorgungen zu.

Durch kosmische Strahlung verursachte Ausfälle treten zufällig während der Lebensdauer eines Halbleiterbausteins auf, wobei sich die Ausfallrate (Failure in Time – FIT) eines Bausteins mit beschleunigten Tests prognostizieren lässt. Wie die Testergebnisse

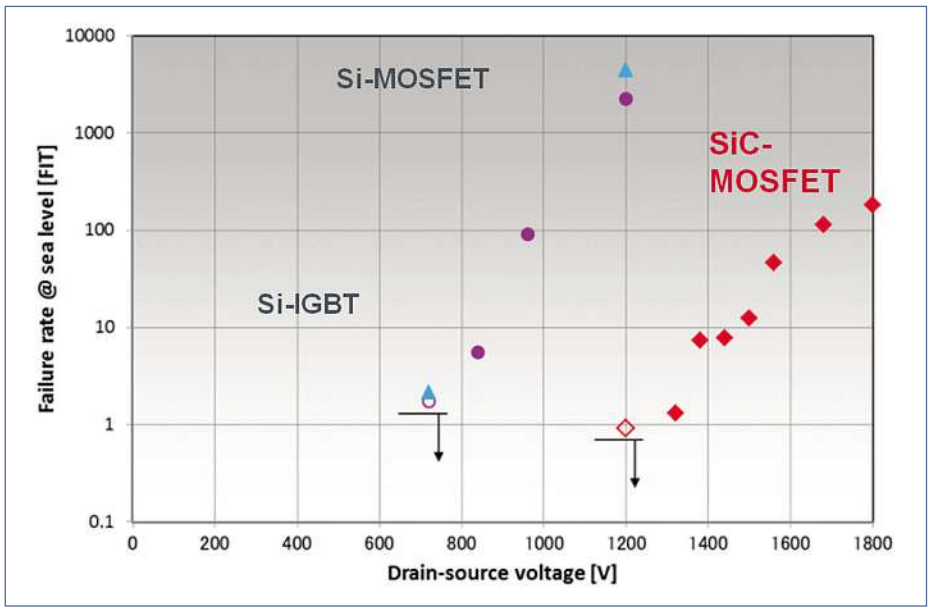


Bild 4: *FIT-Wert durch kosmische Strahlung bei Silizium-Bauelementen (IGBTs und MOSFETs) und SiC-MOSFETs mit gleichem Nennstrom und gleicher Nennspannung.*

in Bild 4 darstellen, nimmt der FIT-Wert in der Regel exponentiell mit der Sperrspannung zu. In der Abbildung werden Bausteine auf Siliziumbasis (IGBTs und MOSFETs) mit SiC-MOSFETs von ROHM Semiconductor verglichen, wobei alle Bauelemente den gleichen Nennstrom und die gleiche Nennspannung haben. Wie man sieht, ist der FIT-Wert der SiC-MOSFETs um bis zu drei Größenordnungen geringer als der entsprechender Silizium-Bauelemente.

Der Grund für diese signifikante Verbesserung liegt in einigen Eigenschaften der SiC-MOSFETs, die für ihre Beständigkeit gegen kosmische Strahlung sorgen. Unter anderem ist die bei gleicher Stromtragfähigkeit kleinere Chipfläche anzuführen, sowie der größere Abstand der elektrischen Feldstärke im gesperrten Zustand zur Durchbruchfeldstärke des Werkstoffs.

Preis-Leistung-Verhältnis von Silizium zu Siliziumkarbid

Bekanntermaßen sind die Produktionskosten von Siliziumkarbid-Wafern höher als die von Silizium-Wafern. Neben anderen Faktoren liegt dies an der Energie, die zum Züchten der Kristalle benötigt wird. Es ist allerdings zu erwarten, dass dieser Kostenunterschied in den nächsten Jahren spürbar geringer wird, wofür unter anderem folgende Faktoren verantwortlich sind: Erhöhung der Wafergröße, Verringerung der Defekte auf den Wafern sowie der Prozesse und nicht zuletzt Skaleneffekte infolge der zunehmenden Verbreitung von SiC-Bauelementen. Ungeachtet des höheren Preises der Bauelemente lassen sich bereits heute SiC-basierte Systeme herstellen, die wirtschaftliche Vorteile bieten. Im folgenden Abschnitt werden exemplarisch zwei Systeme beschrieben, die durch die Umstellung auf SiC-Schalter kostengünstiger werden.

Hilfsstromversorgungen und Industrie-Stromversorgungen

Industrielle Systeme benötigen eine Hilfsstromversorgung für Peripherie-Bauteile wie etwa Mikrocontroller, Gate-Treiber, Lüfter, LCDs und anderes mehr. Für diesen Zweck kommen häufig Wandler mit der Flyback-Topologie zum Einsatz. In Dreiphasen-Systemen, in denen die Eingangsspannung von Phase zu Phase bis zu 480 VAC betragen kann, sind in der Regel Bauelemente mit Sperrspannungen größer als 1000 V erforderlich.

Bevor es SiC-Schalter gab, wurden Hilfsstromversorgungen mit Silizium-MOSFETs und BJTs mit Sperrspannungen bis 1500 V implementiert, die trotz großer Chipfläche einen hohen Einschaltwiderstand aufwiesen. Dies führte zu großen statischen und dynamischen Verlusten, was nahezu immer die Verwendung von Kühlkörpern erforderte und die Systemkosten ansteigen ließ.

SiC-MOSFETs mit 1700-V-Sperrspannung gibt es dagegen mit Einschaltwiderständen von nur 1 Ω, und wegen der kleinen Chipfläche werden auch die dynamischen Verluste spürbar reduziert. Folglich sind hohe Schaltfrequenzen von bis zu 120 kHz möglich, was nebenbei die Verwendung kleinerer Wandler gestattet, ohne dass irgendwelche Kühlkör-

Stark!

Lassen Sie die Muskeln spielen!

So bleiben Sie im Bereich Power am Ball.

- Mosfets
- IGBT
- Motion Control
- Stromsensoren
- Optokoppler

Mit unserem Know-how.
In allen Phasen Ihrer Entwicklung.
Seit über 30 Jahren stark!

www.glyn.de/power | power@glyn.de

FIRST CLASS PREMIUM SUPPORT
GLYN
High-Tech Distribution

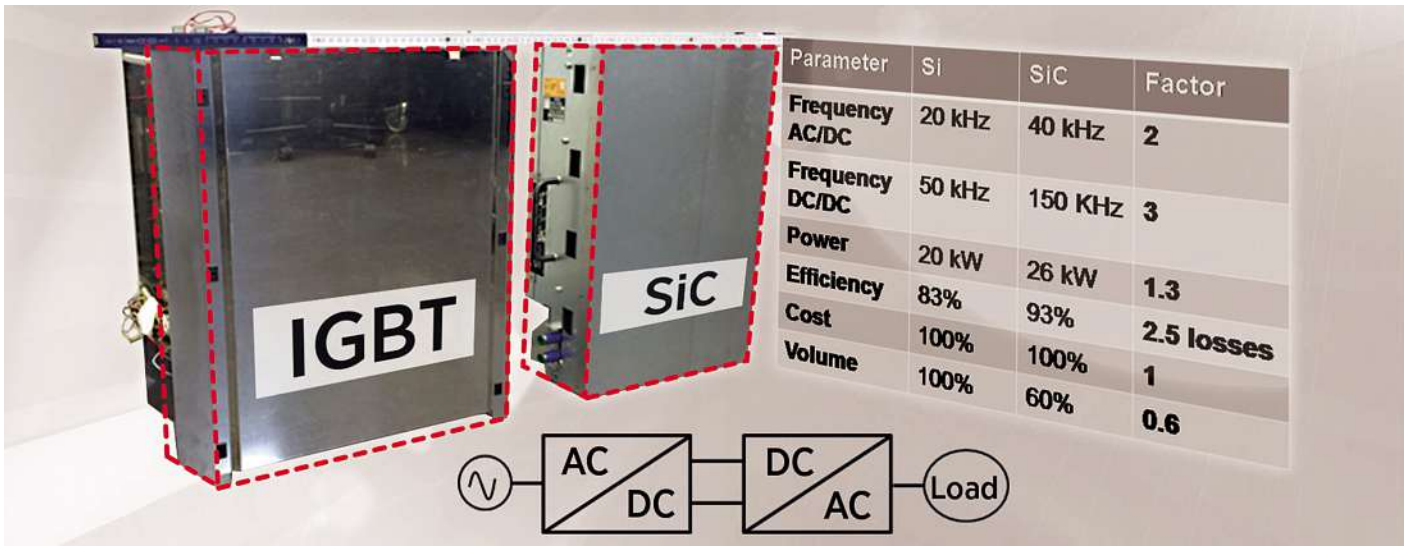


Bild 5: *Gegenüberstellung zweier Schaltnetzteile auf der Basis von Silizium-IGBTs (links) und SiC-MOSFETs (rechts). Die nebenstehende Tabelle zeigt die wichtigsten Parameter der Schaltungen und die entscheidenden Verbesserungen des SiC-basierten Systems.*

per benötigt werden. Dies wird in [4] gezeigt, wo auch der quasi-resonante Controller für Sperrwandler von ROHM vorgestellt wird.

Schaltnetzteile werden in industriellen Anwendungen in großem Umfang zur Versorgung von Gleichstrom-Verbrauchern wie etwa Niederspannungs-Batterien verwendet. Die Systeme bestehen meist aus zwei Stufen, nämlich einem Gleichrichter und einem anschließenden isolierten Gleichspannungswandler. Im oben stehenden Bild 5 sind zwei Industrie-Stromversorgungen nebeneinander zu sehen. Das System links im Bild ist mit Silizium-IGBTs bestückt und arbeitet mit Schaltfrequenzen von 20 kHz (AC-DC) beziehungsweise 40 kHz (DC-DC). Bei einer Nennleistung von 20 kW erreicht diese Stromversorgung einen Wirkungsgrad von 83%. Im Vergleich dazu basiert das neue Stromversorgungssystem rechts in Bild 5 auf SiC-MOSFETs, deren geringere dynamische Verluste ein Anheben der Schaltfrequenz ermöglichten. Die AC-DC-Stufe arbeitet jetzt mit 40 kHz und die DC-DC-Stufe mit 150 kHz. Aufgrund der hierdurch möglichen Verkleinerung der magnetischen Bauelemente ist das Volumen dieser Version um 40% geringer als das des ursprünglichen Systems. Die Systemkosten blieben dabei gleich, während die Nennleistung um 30% auf nunmehr 26 kW angehoben werden konnte.

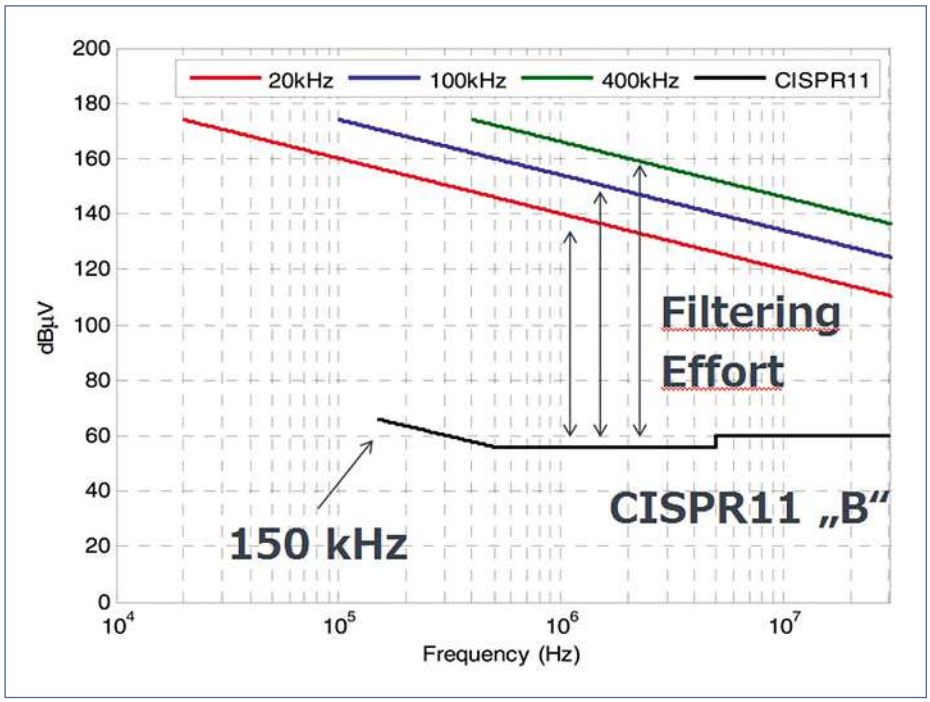


Bild 6: *Filtermaßnahmen an einem netzgekoppelten PV-Wechselrichter bei verschiedenen Schaltfrequenzen. Referenz ist der Standard CISPR11 ‚B' [5] (modifiziert).*

Qualität und Zuverlässigkeit der Halbleiter

Der Umstieg auf SiC-Schalter erfolgt mit der Intention hoher Schaltfrequenzen und Schaltgeschwindigkeiten. Diese wiederum resultieren in sehr geringen dynamischen Verlusten, können aber gewisse Herausforderungen mit sich bringen, was die Erfüllung der Vorgaben zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) angeht.

Die für netzgekoppelte Systeme geltende Norm CISPR11 (besonders in der Version B) setzt Grenzen für elektromagnetische Störgrößen im Frequenzbereich ab 150 kHz. Bild 6 zeigt den Frequenzbereich und die Störaussendungs-Grenzwerte (in dBµV).

Als Beispiel soll ein PV-Wechselrichter betrachtet werden, der bei 20 kHz arbeitet, eine typische Frequenz von Silizium-IGBTs mit über 600 V Sperrspannung. Die vom Wechselrichter kommende rechteckförmige Spannung muss gefiltert werden, bevor sie das Stromnetz erreicht. Mithilfe der Fourier-Transformation lässt sich die Rechteckwelle als eine Reihe von Sinuswellen beschreiben, deren Frequenzen die Grundschwingung (20 kHz) und die ungeradzahligen Harmonischen (60 kHz, 100 kHz usw.) sind. Man kann jetzt zeigen, dass die erste Frequenz, die in den regulierten Bereich fällt, die neunte Harmonische ist, die um nahezu 20 dBµV natür-

TEST	IEC STANDARD	CONDITIONS[1]	SILICON[1]	SiC[2]	BEMERKUNGEN SiC[2]
High Temperature Reverse Bias	60747	1000 h @ 95% $V_{ds,\ max}$, T_{amb} = 125..145°C	✓	✓	@ 100% $V_{ds,\ max}$, $T_{amb} = T_{j,\ max}$ = 175°C
High Temperature Gate Bias	60747	1000 h @ ±$V_{GS,\ max}$, $T_{amb} = T_{j,\ max}$	✓	✓	
High Humidity High Temperature Reverse Bias	60068-67	1000 h @ $V_{ds,\ max}$ = 80V 85% RH, T_{amb} = 85°C	✓	✓	$V_{ds,\ max}$ = 100 V
High Temperature Storage	60068-2-2	1000 h @ $T_{STG,\ max}$	✓	✓	
Low Temperature Storage	60068-2-1	1000 h @ $T_{STG,\ min}$	✓	✓	**1** Basierend auf den industriellen Standardests für Produktqualifizierung gemäß dem „Semikron Application Manual“ [1] **2** Gemäß der ROHM-Qualifizierung diskreter Bauelemente, nach JEITA ED-4701.
Thermal Cycle	60068-2-14	100 cycles $T_{STG,\ max}$ - $T_{STG,min}$	✓	✓	

Bild 7: *Die Tabelle zeigt Qualifikationsprozesse von Silizium- und SiC-basierenden Schaltern.*

lich gedämpft wird. Dieser in [5] anschaulich dargestellte Sachverhalt ist in Bild 6 wiedergegeben.

Hebt man die Frequenz nun auf beispielsweise 100 kHz an, fällt bereits die dritte Harmonische in den regulierten Bereich. Dementsprechend erfolgt eine um etwa 18 dBµv geringere natürliche Dämpfung, was durch einen passiven Filter kompensiert werden muss.

Um eine Erhöhung der Systemkosten durch den zusätzlichen Filteraufwand zu vermeiden, empfiehlt es sich, die Schaltfrequenz knapp unter 50 kHz anzusetzen (mit dieser Maßnahme fällt dann die dritte Harmonische nicht mehr in den regulierten Bereich) oder etwas kleiner als 150 kHz zu wählen (Grundschwingung fällt noch nicht in den regulierten Bereich). Wird eine höhere Schaltfrequenz gewünscht, liegt der nächste interessante Wert laut Literaturhinweis [5] bei über 400 kHz, wo der passive Filter erneut kleiner wird. Parasitäre Elemente wie etwa Streuinduktivitäten, Streukapazitäten und Streuwiderstände aus der Umgebung können den Betrieb bei solchen Frequenzen stören.

Ihre Ursache können beispielsweise Gehäuse, Isolationsfolien, Serienwiderstände von Kondensatoren, das Leiterplatten-Design usw. sein. Zur Vermeidung diesbezüglicher Problem könnten Resonanz-Topologien eine interessante Option sein. Schaltungen wie etwa Serienresonanz-LLC-Wandler [6] vermeiden harte Schaltvorgänge und reduzieren dadurch die Abstrahlung elektromagnetischer Störgrößen. Außerdem lässt sich die Schaltgeschwindigkeit kontrollieren. Der Spannungsverlauf ist dabei eher trapezförmig und die natürliche Dämpfung der hochfrequenten Harmonischen verbessert sich. // KU

ROHM Semiconductor

Literaturhinweise:

[1] *„Semikron Application Manual“, 2nd edition, page 117. Available online https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-manual-power-semiconductors-english-en-2015*

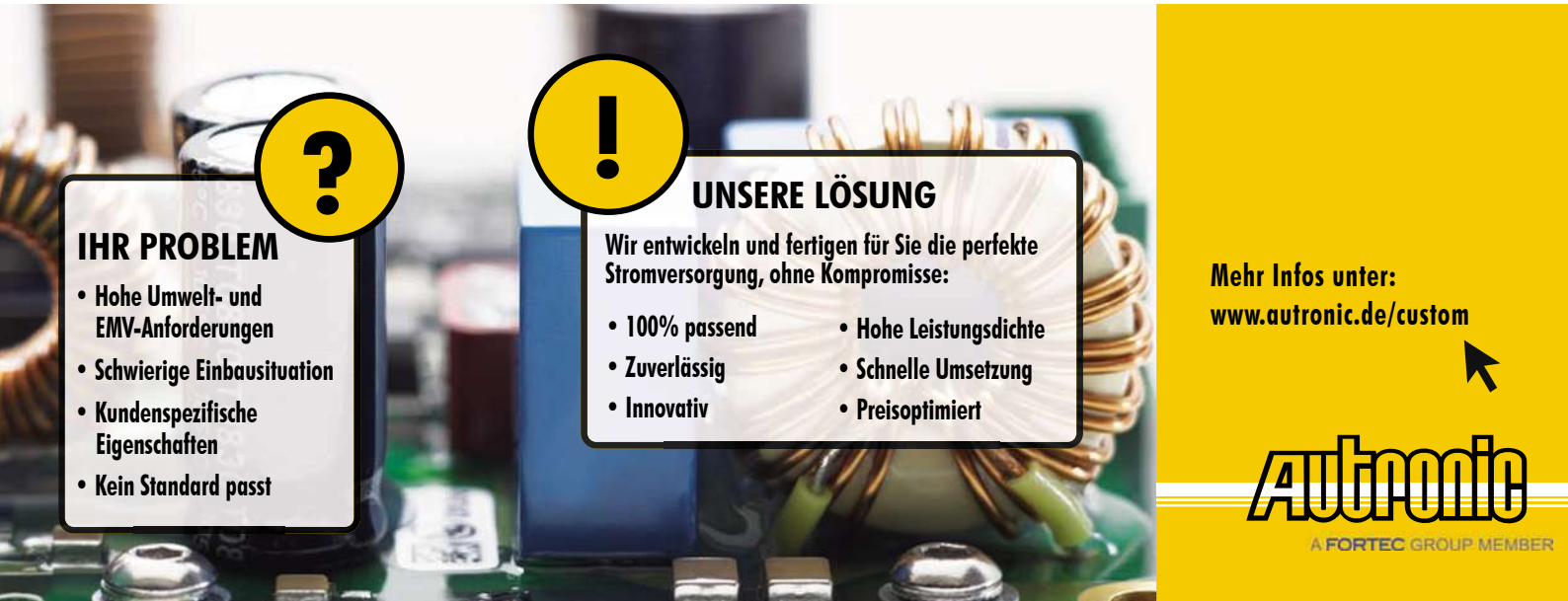
[2] *“ROHM Semiconductor shows 3rd Generation SiC MOSFETs with Trench Gate Structure”. Available online http://www.powerguru.org/rohm-semiconductor-shows-3rd-generation-sic-mosfets-with-trench-gate-structure/*

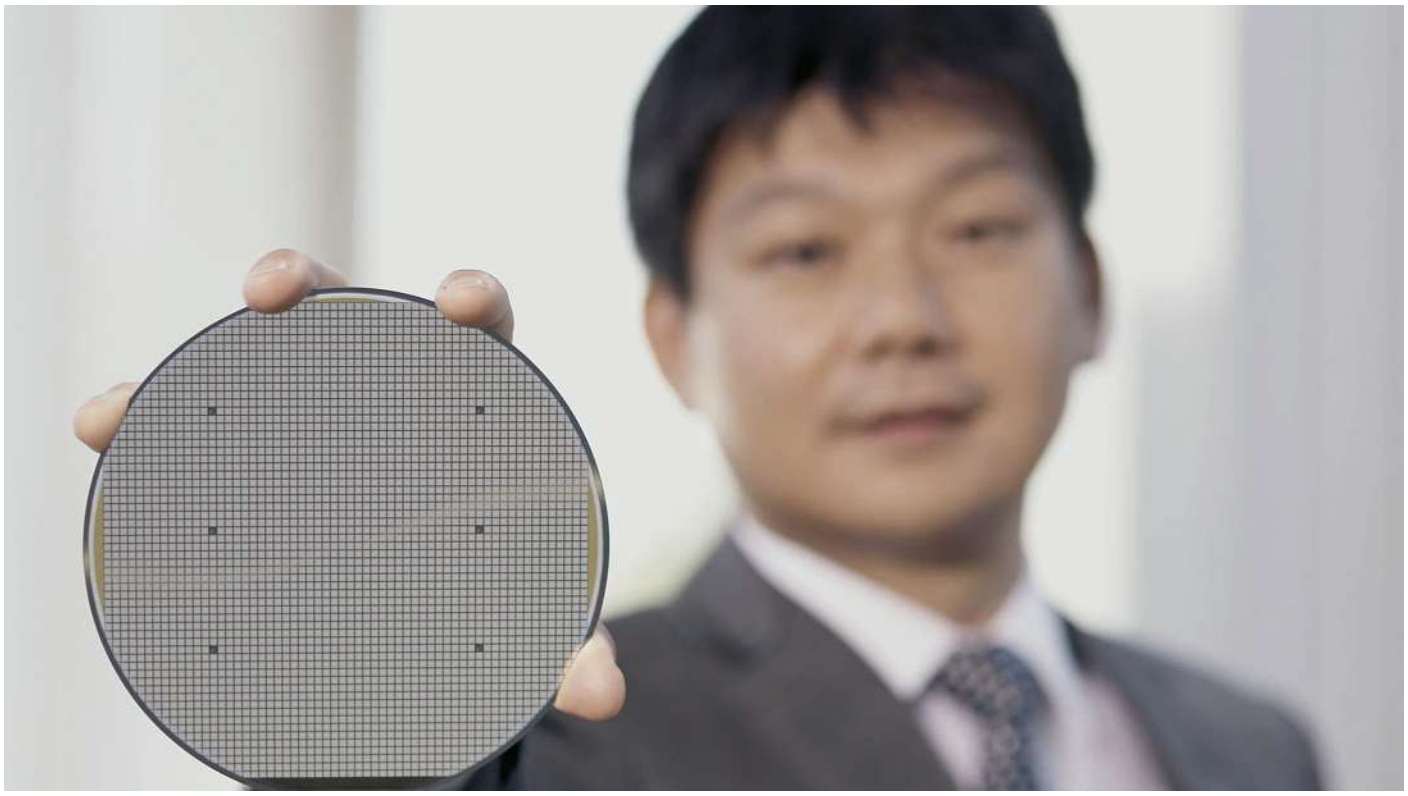
[3] *Source : H. Asai, I Nashiyama, K Sugimoto, K Shiba, Y Sakaide, Y Ishimaru, Y Okazaki ,K Noguchi, T Morimura “Tolerance Against Terrestrial Neutron-Induced Single-Event Burnout in SiC MOSFETs” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol.61, 2014.*

[4] *Application Note “BD768xFJ-LB series Quasi-Resonant converter Technical Design”. Available online.*

[5] *A. C. Schittler, D. Pappis, P. Zacharias: “EMI filter design for high switching speed and frequency grid-connected inverters”, EPE 2016.*

[6] *Y. Nakakohara, et al “Three Phase LLC Series Resonant DC/DC Converter Using SiC MOSFETs to Realize High Voltage and High Frequency Operation”, IEEE Transactions On Industrial Electronics.*





Bilder: ROHM

Dr. Kazuhide Ino, ROHM: *„Mit dem Einsatz in der Formel E zeigen wir, dass unsere SiC-Dioden und SiC-Power-MOSFETs den Wirkungsgrad elektrischer Systeme deutlich steigern."*

Siliziumkarbid-Technik hält Einzug in den Antrieben der Formel E

Die Hochtemperatureignung bis 300 °C ist eine der besonderen Stärken von SiC-Halbleitern. Ideal für etwa die Elektromobilität, die hohe Leistungsdichte, Kompaktheit und Zuverlässigkeit verlangt.

Erklärtes Ziel der Formel E ist, weltweit die Elektromobilität voranzubringen; dazu stehen wichtige Themen wie Nachhaltigkeit und Umweltschutz im Vordergrund. Während lärmende Boliden mit fossilem Brennstoff ihre Runden auf permanenten Rennstrecken in der urbanen Peripherie drehen, kommen die E-Teams mit 20 Fahrern und 40 Motorcarts direkt in die Herzen der Städte. Nach Hongkong (2016/2017) bemühen sich Tokio und Yokohama um ein Formel-E-Rennen in der vierten Saison 2017/2018.

Weil alle Kraft aus einer Lithium-Ionen-Batterie kommt, ist das clevere Energie-Management der Schlüssel zum Erfolg. Speed bis zum Limit bedeutet Duelle bei Geschwindigkeiten bis zu 220 km/h. Stillstand gibt es keinen – vor allem nicht in der Weiterentwicklung von Leistungshalbleitern für die Inverter der Rennfahrzeuge.

„Das Beste aus der zur Verfügung stehenden Energie herauszuholen ist unsere Maxime", konstatiert Dr. Kazuhide Ino, General Manager der Power Devices Division bei ROHM Semiconductor in Kyoto, „mit der Technologie-Partnerschaft im Venturi-Team will ROHM zeigen, dass Power Devices auf Basis von Siliziumkarbid serientauglich sind und beispielsweise in der Elektromobilität den Wirkungsgrad elektrischer Systeme deutlich steigern.

Die Herausforderung für Teams und Fahrer liegt zum einen im effizienten Einsatz der zur Verfügung stehenden Energie und zum anderen darin, die Batterieleistung bestmöglich auf die Rennstrecke zu bringen. Hier kommt die neu entwickelte Halbleitertechnologie mit Siliziumkarbid (SiC) des Sponsoring-Debütanten ROHM ins Rennen. Im Vergleich zum herkömmlichen Silizium kann das neue Material höhere Lasten und Spannungen verarbeiten und verbraucht dabei deutlich weniger Energie – selbst bei sehr hohen Temperaturen in der Anwendung. Durch den Einsatz von SiC als Kernelement der Partnerschaft erhoffen sich der Luxussportwagen-Hersteller Venturi und der SiC-Halbleiterspezialist ROHM deutliche Wettbewerbsvorteile. Gemeinsames Ziel ist es, die technologische Weiterentwicklung anzuführen und die Energieeffizienz elektronischer Systeme weiter zu steigern – sowohl auf dem Gebiet des Formel-E-Rennsports als auch bei

Anwendungen leistungselektronischen Bauteile für den Einsatz in der Industrie.

Weitere Verbesserungen durch SiC-MOSFETS

Siliziumkarbid ist die chemische Verbindung aus Silizium und Kohlenstoff – gefertigt in einem aufwendigen Verfahren der Einkristall-Züchtung bei einer Prozesstemperatur von über 2000 °C. Die Vorteile von SiC im Vergleich zum noch gängigen Material Silizium sind vielfach: Leistungselektronische Systeme werden kompakter und verbrauchen weniger Energie. Die etwa halbierte Gerätegröße und das dadurch eingesparte Gewicht ermöglichen dem Motorsport zusätzlich eine bessere Gewichtsverteilung. SiC-Module können mit höheren Lasten und Spannungen arbeiten und sind durch deutlich reduzierte Schaltverluste charakterisiert.

Der Inverter im Venturi-Monoposto für die dritte Saison enthält SiC-Schottky-Dioden und ist damit zwei Kilogramm leichter als das Einheitsmodell der Vorsaison. Die elektrische Effizienz stieg um 1,7%, zugleich schrumpfte das Volumen des Kühlsystems um 30%. „Doch das ist erst der Anfang“, versichert Kazuhide Ino, „für die vierte Saison werden durch den Einbau von SiC-MOSFETs weitere große Entwicklungsschritte und entsprechend deutliche Verbesserungen möglich.“

Sponsoring und Technologiepartnerschaft

Für die Automobilindustrie und die Elektromobilität werden SiC-Anwendungen und leistungsstarke Inverter immer wichtiger. Durch das Sponsoring-Debüt macht SiC-Hersteller ROHM global auf seine ehrgeizigen Ziele im Segment der elektrischen Antriebstechnik aufmerksam. Dieses Engagement ist nach Angaben der Power-Experten aus Kyoto ein großer Schritt und soll auch auf die gesellschaftlichen Aktivitäten im Segment Energie hinweisen.

Gewicht gespart: *Durch den Einsatz von SiC-Schottky-Dioden wurde der Inverter des Fahrzeugs um 2 kg leichter.*

Der Venturi FE Car wähend des Rennens: *Der Einsatz der Siliziumkarbid-Dioden erhöhte die Effizienz des elektrischen Antriebs um 1,7%.*

Kazuhide Ino: „Die Vorteile von SiC, die für viele Industrien relevant sind, werden durch das Projekt mit Venturi klar herausgestellt. Die Formel E demonstriert wie effizient die SiC-Technologie funktioniert und ihren Weg in die Serienproduktion und Alltagsanwendungen finden wird.“ // **KU**

ROHM Semiconductor

Das Rennen der Elektro-Monoposti

Die Teams der Formel E sind bestrebt, die Gesamtenergie der Batterien in den kommenden Saisons zu steigern. Für 2016/17 wurde die Energiemenge auf 33 kWh und für die Saison 2018/19 auf 40 kWh begrenzt. Auch die mögliche Motorleistung der Rennen hat zugelegt: von 170 kW in der zweiten Saison auf 200 kW in der dritten und 220 kW in der vierten Saison. Die ursprünglich für die dritte Saison vorgesehene Erhöhung der Maximalleistung auf 250 kW sowie die Erhöhung der Leistung im Rennbetrieb auf 200 kW wurde Anfang 2016 auf die vierte Saison 2018/19 verschoben. Stattdessen haben die Verantwortlichen die Leistung bei der Energierückgewinnung (auch als Rekuperation bezeichnet) von 100 auf 150 kW erhöht. Zu einem Rennen zugelassen sind 10 Teams, pro Team gibt es zwei Fahrer und vier Autos. Die Rennstrecke ist 2,5 bis 3 km lang.

FLEXIBEL FÜR IHRE ANFORDERUNGEN

Mit modularen Sensorbaukästen schneller zur kundenindividuellen Lösung
Ob für Drehzahl-, Wege- oder Winkelabfragen – mit unseren modularen Sensorbaukästen lassen sich kundenindividuelle Sensoren für Industrieanwendungen schnell und kostengünstig realisieren. Nutzen Sie diese Flexibilität.
www.switches-sensors.zf.com

ZF

Siliziumkarbid als Alternative zu Silizium und Galliumnitrid

Warum SiC-Bausteine in vielen leistungselektronischen Designs die bessere Alternative zu Silizium und Galliumnitrid sind, skizziert der Artikel am Beispiel eines Resonanzwandlers.

JOHN W. PALMOUR, JOHN MOOKEN *

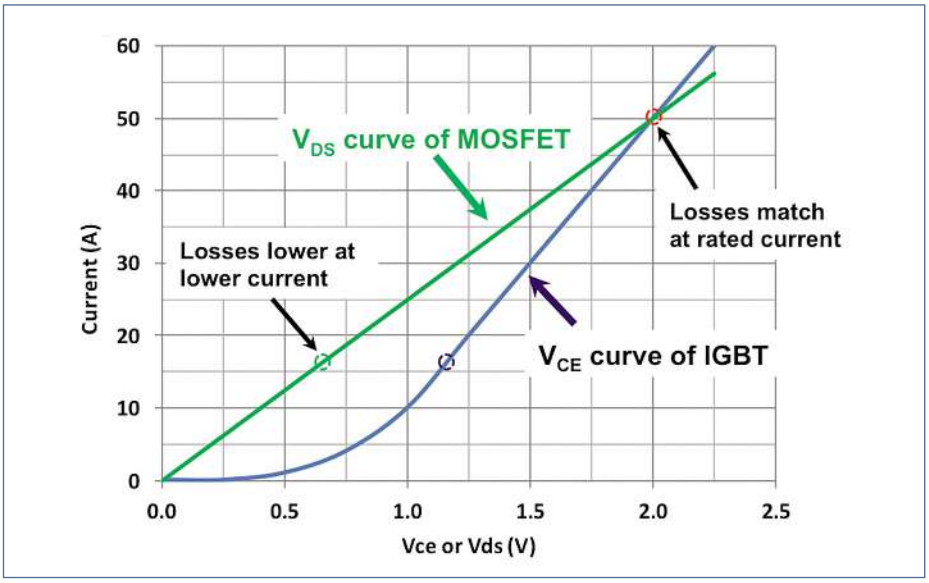
Bei der Auswahl von MOSFETs und IGBTs stehen allzu oft die Kosten pro Verstärker im Mittelpunkt. Von Bedeutung sind jedoch die Kosten pro kW eines leistungselektronischen Systems. Nicht nur in diesem Punkt haben Systeme mit Siliziumkarbid-Bausteinen klare Vorteile. Es gibt eine Vielzahl von Systementwicklungen die zeigen, dass SiC-MOSFETs im Vergleich zu Leistungskomponenten auf Silizium-Grundlage auch hinsichtlich Performance Vorzüge aufweisen. Das ist vor allem bei Anwendungen im Bereich 900 bis 1200 V der Fall. Ein wesentlicher Vorteil von SiC-MOSFETs ist, dass sich damit vorhandene Multi-Level-Schaltungstopologien vereinfachen lassen. Der Grund ist, dass bei SiC-MOSFETs deutlich niedrigere Schaltverluste auftreten als bei Silizium-Bausteinen und entsprechenden IGBTs.

Letztlich schlägt sich der Einsatz von SiC-Komponenten in Systemen nieder, die geringere Material- und Betriebskosten aufweisen und zudem über eine höhere Effizienz verfügen. Der letztgenannte Faktor ist, trotz der höheren Schaltfrequenzen, auf die niedrigen Schaltverluste zurückzuführen.

Konventionelle Si-MOSFETS und IGBTs sind für einen bestimmten DC-Nennstrom bei Gehäusetemperaturen von 25 °C spezifiziert. Die Betriebstemperaturen erreichen jedoch in der Praxis bis zu 100 °C. Die Folgen sind deutlich niedrigere Stromwerte und damit ein De-Rating der Komponenten. Dies ist auf einen Anstieg der V_{CEsat} bei IGBTs beziehungsweise $R_{DS(on)}$ bei MOSFETs bei zunehmender Temperatur zurückzuführen. Damit verbunden ist eine Zunahme der Leitungsverluste.

*** John W. Palmour**
... ist Chief Technology Officer bei Wolfspeed.

John Mooken
... ist Applications Manager bei Wolfspeed, Durham/North Carolina.



Bilder: Wolfspeed

Bild 1: *Vergleich eines Si-IGBT und SiC-MOSFET (beide 50 A) in einem Modul; beim SiC-Baustein fehlt das typische Knie in der I-V-Kurve.*

Ein weiterer Grund für das De-Rating sind die Schaltverluste. Diese werden bei der Festlegung der Nennströme nicht berücksichtigt, und dies, obwohl die Komponenten in entsprechenden Anwendungen zum Einsatz kommen.

Unterschiede zwischen SiC- und Si-Bausteinen

SiC-MOSFETs unterscheiden sich in mehrfacher Hinsicht von Si-IGBTs und entsprechenden MOSFETs. Sie besitzen beispielsweise niedrigere Leitungsverluste und extrem geringe Schaltverluste bei erhöhten Betriebstemperaturen. Das führt dazu, dass SiC-MOSFETs kein „Knie“ bei der I-V-Kurve aufweisen (Bild 1). Das zeigt ein Vergleich eines Si-IGBT und SiC-MOSFET, die beide für 50 A spezifiziert sind. Die Leitungsverluste der Komponenten sind bei Erreichen des Nennstroms gleich. Allerdings laufen die De-Rating-Kurven bei steigender Betriebstemperatur auseinander. Bei einem Drittel des Nennstroms weist der SiC-Baustein nur die Hälfte der Leitungsverluste des Si-IGBT auf. Das heißt, er arbeitet erheblich effizienter.

Im Vergleich zu einem Super-Junction-MOSFET aus Silizium mit vergleichbaren Nennwerten für Strom und Spannung bei Raumtemperatur (25 °C) ist beim SiC-MOSFET eine deutlich geringere Abhängigkeit von $R_{DS(on)}$ als Funktion der Temperatur zu beobachten. Die Folge: Deutlich niedrigere Leitungsverluste im hohen Temperaturbereich (Bild 2). Hinzu kommen die um den Faktor fünf bis sechs geringeren Schaltverluste von SiC-MOSFETs.

Entwickler, die SiC-MOSFETs statt Silizium-Bausteine in Leistungswandlern einsetzen möchten, sollten jedoch folgenden Punkt berücksichtigen: Die Datenblätter von SiC-Komponenten orientieren sich an denen von Si-Bausteinen. Die angegebenen Nennstrom-Werte von SiC-MOSFETs spiegeln somit nicht deren Einsatzmöglichkeiten in der Praxis wider. Diese lassen sich jedoch mit kosten-

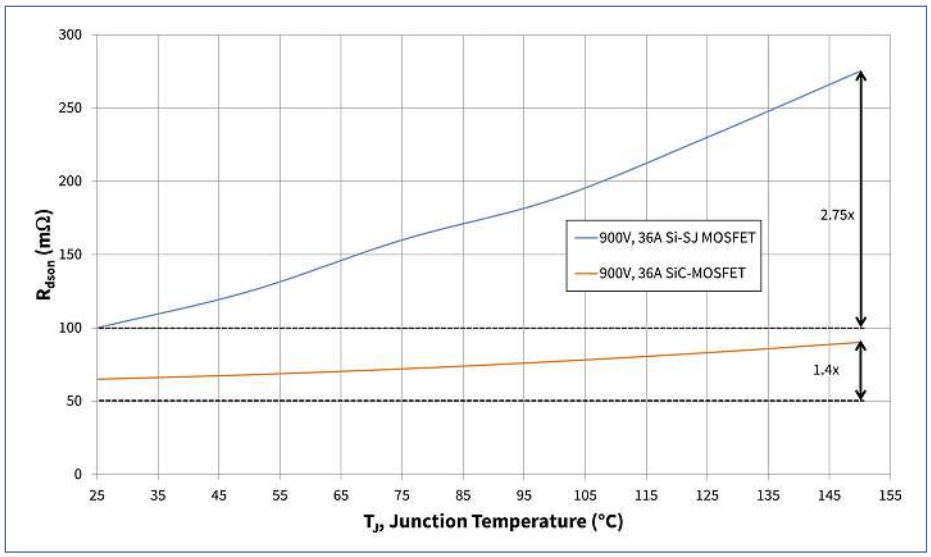


Bild 2: *Ein Si-SJ-MOSFET (900 V, 36 A) in einem TO-247-Gehäuse im Vergleich zu einem SiC-MOSFET; der SiC-Baustein weist eine geringere Abhängigkeit des RDS(on) von der Temperatur auf. Das hat geringere Leitungsverluste zur Folge.*

losen Online-Tools ermitteln, etwa dem SpeedFit Design Simulator von Wolfspeed. Diese Anwendung ermittelt die Verlustleistung bei bestimmten Temperaturen und hilft somit Entwicklern dabei, die passenden SiC-Komponenten zu finden.

SiC-MOSFETs in High-Power-Applikationen

Schaltelemente für High-Power-Anwendungen wie Motorantriebe, Solarwandler und Hilfsaggregate werden meist in einem Leistungsmodul verbaut, zusammen mit Gate-Treibern und einem Controller. Im Folgenden wurde ein Drei-Phasen-Inverter für 140 kW mithilfe eines MOSFET-Moduls (300 A) und dem passenden Gate-Treiber neu entwickelt; ersetzt wurde ein 450-A-Si-IGBT-Modul. Dank der geringeren Schaltungsverluste kann die Version mit SiC-Komponenten mit deutlich höheren Schaltfrequenzen betrieben werden. Dadurch ließen sich bei einer Schaltfrequenz von 10 kHz vier Si-IGBT-Module durch ein einziges SiC-Modul substituieren (Bild 3).

Leistungswandler mit Si-IGBT-Modulen weisen eine lineare Leistungsabgabe in Relation zur Größe des Systems auf. Die Schaltfrequenz ist im vorliegenden Beispiel jedoch wegen der Schaltverluste auf 10 kHz begrenzt. Bild 3 zeigt den Ausgangsstrom der Si-Komponenten bei 3 kHz. Das System mit vier Si-IGBTs mit 450 A pro Schalter und einem Nennwert von 750 A_{rms} erreicht bei 10

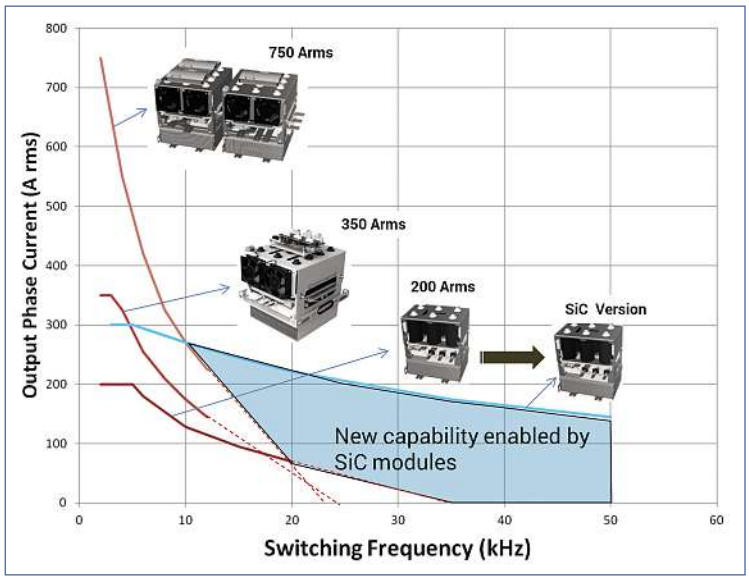


Bild 3: *SiC-basierte Leistungswandler haben bei Schaltfrequenzen von 10 kHz eine höhere Performance als Si-IGBTs.*

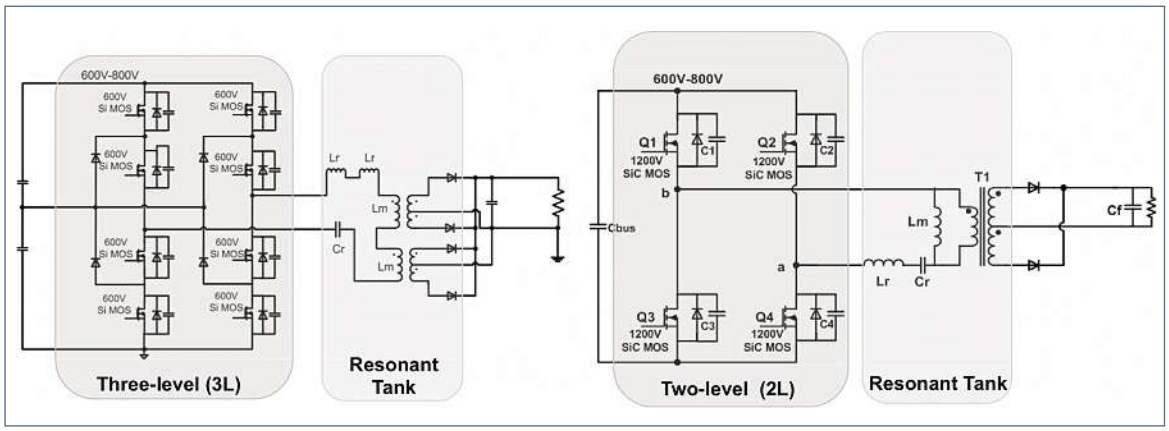


Bild 4: *Ein Zwei-Phasen-LLC-Resonanz-Leistungswandler erfordert bei Einsatz von Si-Bausteinen ein komplexes Design mit drei Ebenen (links). Bei Verwendung von SiC-MOSFETs (rechts) reichen zwei Ebenen aus.*

kHz nur noch 280 A_{rms}. Das entspricht dem Wert eines deutlich kompakteren Systems mit nur einem 300-A-SiC-MOSFET pro Schalter.

Außerdem verkraftet das System mit SiC-Bausteinen deutlich höhere Schaltfrequenzen. Dadurch erschließen sich neue Anwendungsfelder, für die Si-Komponenten nicht in Frage kommen. De facto stellt ein Power-Modul auf Basis von SiC bei 10 kHz dieselbe Leistung zur Verfügung wie ein Konverter mit vier Modulen mit Si-IGBTs und einem Nennstrom von 1800 A. In der Praxis kann der Si-Baustein davon jedoch bei Frequenzen von 2 kHz bis 3 kHz nur 750 Arms nutzen.

Für das Design sind weniger Komponenten erforderlich

Zudem gilt es einen weiteren Punkt zu berücksichtigen: SiC-Module kommen aufgrund der höheren Frequenzen mit weniger Filtern und magnetischen Komponenten aus. Dadurch verringert sich das Gewicht der Bestandteile eines Wechselrichters, inklusive der Induktoren und Filter-Kondensatoren. Zudem ist der Platzbedarf geringer. Dies führt zu erheblichen Einsparungen bei der Größe, dem Gewicht und den Kosten bei anderen Komponenten, etwa dem Gehäuse und der Verdrahtung.

Entwicklern von Hochleitungs-Umrichtern eröffnen sich dadurch neue Möglichkeiten. Sie können Systeme designen, die hohe Schaltfrequenzen unterstützen, ohne dass die Effizienz darunter leidet. Dies ist die Grundlage für kompaktere Leistungswandler-Systeme, die eine einfachere Struktur, kürzere Antwortzeiten und eine höhere Zuverlässigkeit aufweisen.

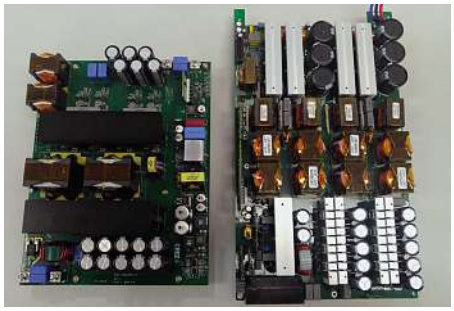


Bild 5: *LLC-Leistungswandler für 20 kW; links ein System mit 1-kV-SiC-MOSFETs und zwei Ebenen, rechts ein Drei-Ebenen-Modell auf Basis von Si-MOSFETS mit 600 V.*

Einfachere und preisgünstigere Schaltungstopologien

Ein weiterer wichtiger Punkt sind die niedrigeren Kosten. Die einfacheren Schaltungstopologien, die SiC-MOSFETs ermöglichen, schlagen sich in geringeren Aufwendungen auf der System-Ebene nieder. Ein Beispiel ist ein typischer Zwei-Phasen-LLC-Resonanzwandler für 800 VDC. Um die Limitierungen von 1200-V-Si-MOSFETs hinsichtlich Schaltfrequenz zu umgehen, kommt eine komplexe Topologie mit drei Ebenen in einer Vollbrücken-Konfiguration zum Zuge. Sie erfordert den Einsatz von acht 600-V-Schaltelementen und mehreren Freilaufdioden. Wegen der inhärenten Schaltverluste ist die typische Schaltfrequenz auf 100 bis 200 kHz begrenzt. Dadurch sind deutlich größere und komplexere induktive und kapazitive Elemente im Schwingkreis erforderlich.

Anstelle der Si-Komponenten lassen sich vier 1200-V-SiC-MOSFETs verwenden. Das Ergebnis ist ein Vollbrücken-Konverter mit zwei Ebenen in einer Nullspannungsschaltungs-Konfiguration (Zero Voltage Switching; ZVS). Das ZVS-Design zeichnet sich durch eine höhere Effizienz und reduzierte Schaltverluste aus. Dies wird durch die minimalen Stromwerte in den Leistungstransistoren beim Schaltvorgang erreicht.

Außerdem lassen sich die vier SiC-MOSFETs bei höheren Umgebungstemperaturen und Schaltfrequenzen als die Si-IGBTs betreiben. Der Wandler mit SiC-Bausteinen kann daher mit Frequenzen von 200 bis 400 kHz arbeiten. Das wiederum ermöglicht ein kompakteres Design des Systems und reduziert die Bauteinezahl um etwa 20%.

Den Unterschied zwischen Leistungskomponenten auf Grundlage von Siliziumkarbid und Silizium macht folgendes Beispiel deutlich, in dem ein Drei-Ebenen-LLC-DC/DC-Wandler mit 600-V-Si-MOSFETs einem Zwei-Ebenen-LLC mit SiC-MOSFETs gegenübergestellt wird. Beide Systeme sind für 20 kW ausgelegt (Bild 5). Die Version mit Si-Bausteinen ist 220 mm x 340 mm groß und wiegt 4,1 kg. Die Variante mit Siliziumkarbid-Komponenten misst dagegen nur 220 mm x 275 mm und wiegt 3,2 kg.

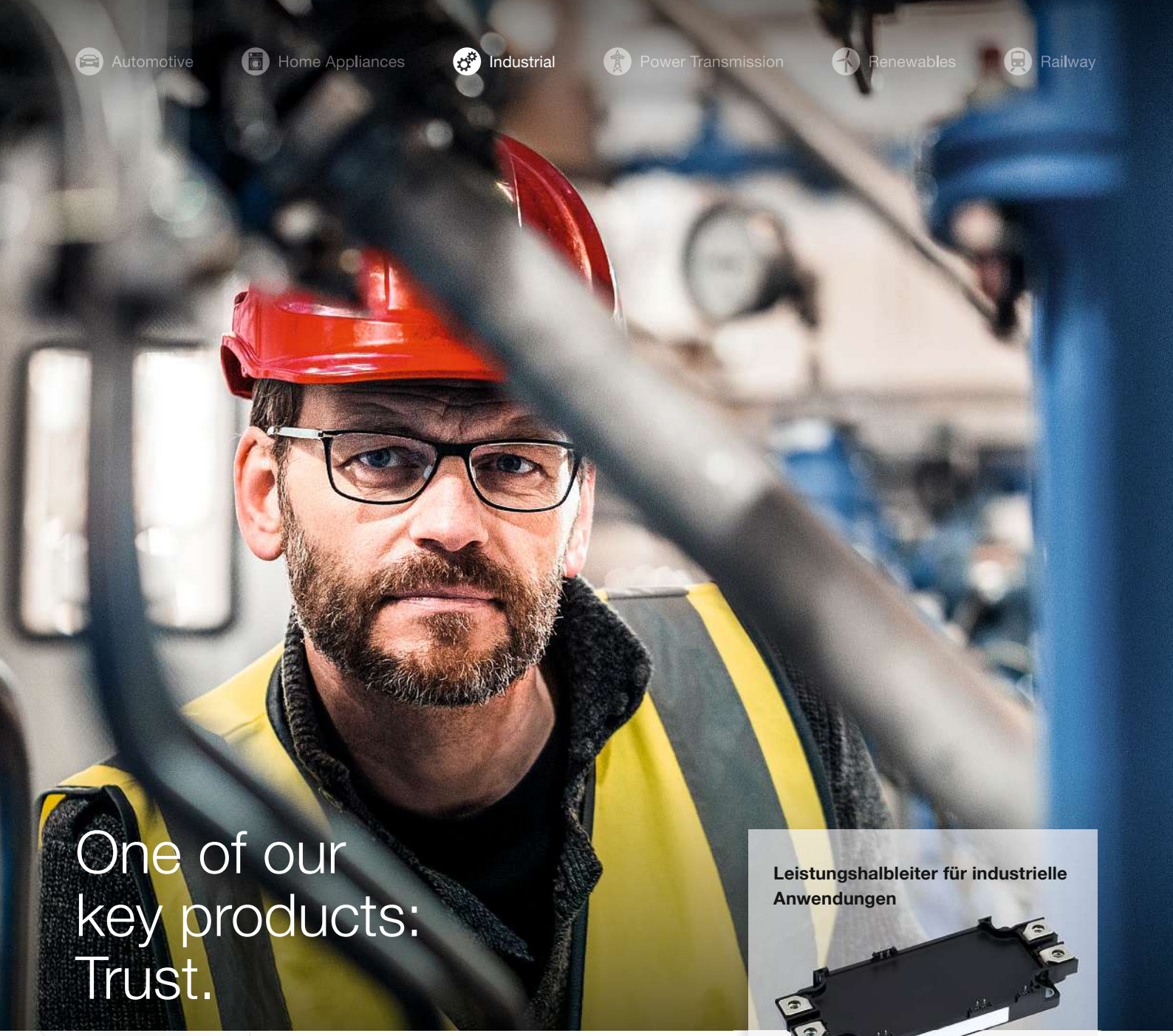
Alle genannten Betrachtungen relativieren die häufig geäußerte Meinung, SiC-Systeme seien unter dem Strich zu teuer. // **KU**

MANUFACTURER & VOLTAGE	PART #	ON-RESISTANCE & CURRENT AT TC = 100 C	DISTRIBUTION PRICE PER 100
Infineon CoolMOS 900 V	IPW90R120C3	120 mohm 23 A	$ 11.50
Wolfspeed (Cree) 900 V SiC	C3M0065090J	65 mohm 23 A	$9.62
GaN Systems 650 V GaN	GS66508P-E05-TY	50 mohm 23 A	$27.7

Bild 6: *Kostenvergleich von Leistungshalbleitern mit 900 V für Anwendungen mit niedrigen Schaltzeiten.*

Wolfspeed

Automotive | Home Appliances | **Industrial** | Power Transmission | Renewables | Railway



One of our key products: Trust.

Leistungshalbleiter von Mitsubishi Electric.

Präzise und effiziente Steuerung von dynamischen Prozessen stellt hohe Ansprüche an die Komponenten. Mit über 30 Jahren Entwicklung und Produktion von IGBTs und der Weiterentwicklung wegweisender Technologien bietet Mitsubishi Electric ausgezeichnetes Know-how, um diese Anforderungen zu erfüllen. Neueste Chip-, Aufbau- und Verbindungstechnologien bieten verlängerte Modullebensdauer, hohe Leistungsdichte für kompakte Bauweise, einfache Systemmontage und Unterstützung von skalierbaren Plattformkonzepten.

Leistungshalbleiter für industrielle Anwendungen

7. Generation IGBT Module im NX-Gehäuse

- 7. Generation IGBT mit CSTBT™ Chip-Technologie
- Überragende Langzeitzuverlässigkeit durch optimierte Verbindungstechnik und Hartverguss
- Hohe Lastwechselfähigkeit durch Einsatz neuer IMB-Technologie (Insulated Metal Baseplate)
- Thermisches Interface Material und PressFit Kontakte
- Umfassendes Produktportfolio für 650 V, 1200 V und 1700 V Spannungsklassen

eco Changes **for a greener tomorrow**

Mehr Informationen:
semis.info@meg.mee.com
www.mitsubishichips.eu

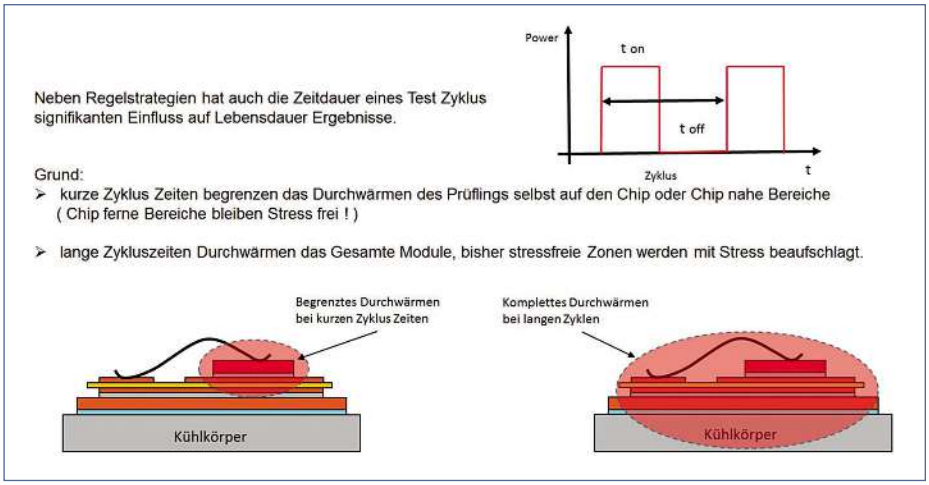
Scannen und bei YouTube mehr über die Produktserie erfahren.

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Power-Cycle-Testes mit detaillierter Analyse

Die Analyse von Lastwechseltests und Ausfallmechanismen sowie das Abschätzen der Lebensdauer sind Inhalt dieses Artikels. Er zeigt die praktische Anwendung der thermischen Transienten-Messung.

PETER FINK *



Bilder: ZFW

Bild 1: *Durchwärmen des Prüflings*

Das Zentrum für Wärmemanagement Stuttgart (ZFW) ist ein in Deutschland führendes Institut im Bereich des Wärmemanagements elektronischer Systeme. Die Ingenieure und Wissenschaftler des ZFW entwickeln neue Technologien rund um die Elektronik-Hardware. Ein Schwerpunkt bildet dabei die thermische Optimierung. Dazu stehen in den Laboren des ZFW in Stuttgart eine Vielzahl von Mess– und Berechnungsmethoden zur Verfügung. Jährlich bearbeitet das ZFW weit über 100 industrienahe, praxisorientierte Projekte. Dazu gehören auch die beschriebenen Lebensdaueruntersuchungen an Leistungsbauelementen mit ihren thermischen Interface Materialien.

Qualitätsstandards von Halbleiter- und Leistungsmodul-Herstellern orientieren sich an internationalen Vorgaben, die in fast allen Schlüsselpunkten identisch sind. Generelle Ziele und Strategien dieser Standards kann man grob in drei Kategorien einteilen: Nachweis einer zeitlich elektrischen Stabilität und Einhaltung der Datenblattvorgaben mit dem Heißsperrdauertest, dem Hochtemperaturtest (Gate-Stresstest) und der Feuchte-Wärmelagerung unter Spannung.

Diese Untersuchungen sind hoch selektive, unverzichtbare Basis-Stresstests mit dem Fokus, die Stabilität der Halbleiterherstellprozesse und Packaging-Assembly-Prozesse (AVT-Aufbauverbindungstechnik) nachzuweisen. Als Prüfparameter dienen die elektrische Stabilität und das Sperrschichtverhalten bzw. die Restströme der eingesetzten Halbleitertechnologie. Eine Aussage über die thermische Stabilität der gesamten AVT ist an dieser Stelle nur zweitrangig.

Der Nachweis der physikalischen und thermischen Stabilität des Gesamtaufbaus erfolgt mit dem Temperatur-Schocktest, Temperatur-Wechseltest (über externes Erwärmen und Kühlen) und dem Lastwechseltest (über internes Erwärmen und externes Kühlen). Dabei bildet der aktive Lastwechseltest, bei dem der Chip intern durch seine eigene Verlustleistung erwärmt und extern gekühlt wird, die realen Einsatzbedingungen am genauesten ab.

Eine Aussage über die notwendige, spätere Weiterverarbeitbarkeit der Module geben Tests zur Temperaturbeständigkeit des Gehäuses, Lötbarkeit und Vibration.

Standardisierte Qualitätsnachweise der Leistungsmodule beim Hersteller zielen auf die „typische" Applikation ab. Allerdings ist dieses Vorgehen fraglich: Speziell in der Leistungselektronik gibt es eine hohe Vielfalt an Applikationen und Belastungsprofilen. Eine typische Applikation, die diese Vielfalt abbildet, ist kaum zu finden. Applikationsabhängig entstehen im Chip Temperaturgradienten und Spannungsbelastungen mit signifikantem Einfluss auf die Lebensdauer des Bauteils. Kurze Zykluszeiten begrenzen ein Durchwärmen des Packages auf den Chip selbst oder Bereiche in der Nähe des Chips. Bereiche in größerer Entfernung vom Chip erfahren nur eine geringe Belastung durch Temperaturgradienten. Bei langen Zykluszeiten hingegen durchwärmt sich der gesamte Aufbau. Zonen, die bei kurzen Zykluszeiten nur einen geringen Temperaturhub erfahren haben, werden stärker erwärmt und auf Grund des CTE-Mismatch durch mechanische Spannungen belastet (Bild 1).

Ein allgemeiner Zuverlässigkeitsnachweis ist daher nur eingeschränkt auf eine bestimmte Applikation übertragbar. Gerade unter den Gesichtspunkten, dass ein Leistungsmodul teilweise hohe Lebensdaueranforderungen (>30 Jahre) haben kann, kombiniert mit strikten, hohen sicherheitsrelevanten Anforderungen, ist ein auf die Applikation zugeschnittener Zuverlässigkeitsnachweis unerlässlich.

Die Thermal Transientenmethode bietet als zerstörungsfreie Messmethode die Möglichkeit eine AVT-Struktur thermisch jederzeit komplett im Detail zu charakterisieren. Alle realen, thermisch relevanten Schichten im direkten thermischen z-Pfad können ausgelesen und bewertet werden, beginnend bei der Sperrschicht, über den Chip, die Lötung, bis hin zur Wärmesenke. Diese kann bei-

*** Peter Fink**
... ist Spezialist für Lebensdaueruntersuchungen von Leistungsbauelementen am Zentrum für Wärmemanagement Stuttgart (ZFW).

spielsweise eine Coolplate oder ein Kühlkörper sein.

Der Messvorgang selbst besteht aus vier Schritten. Erster Schritt: Wahl und Anpassung der Messschaltung für den jeweiligen Halbleitertyp (Diode, IGBT, MOSFET, z.B. bei Dioden $R_{DS(on)}$, Saturation Mode). Zweiter Schritt: Kalibrierung des Halbleiters, ermitteln der Sensitivität in mV/K bei einem definierten Messstrom und Temperaturbereich für den gewählten Messmodus. Dritter Schritt: Eigentliche Thermal-Transientenmessung des Gesamtaufbaus, dazu Aufnahme der Abkühlkurve nach JEDEC 51-14 mit definiertem Messstrom nach vorigem, definiertem Power-Step zur Aufheizung der Anordnung. Die Sperrschicht des Prüflings wird hier als Heizquelle und gleichzeitig als Temperatursensor verwendet. Eine hohe zeitliche Auflösung der Messkurve bis in den Mikrosekundenbereich liefert Informationen über die feinen Strukturen im Inneren des Bauteils.

Die gemessene Spannungskurve im Messmodus ergibt bei Division durch die Sensitivität den hochaufgelösten, zeitlichen Temperaturverlauf der Halbleitersperrschicht zwischen den beiden stationären Zuständen On und Off. Halbleiterstrukturen, wie beispielsweise SiC (Siliziumkarbid) haben nichtlineare Temperaturabhängigkeiten, was bei der Berechnung der Temperaturkurve unbedingt berücksichtigt werden muss.

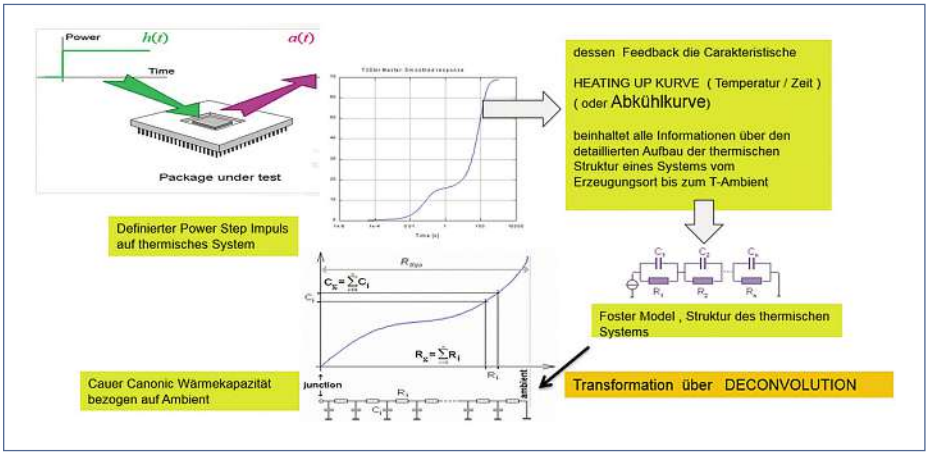


Bild 2: *Prinzip der Thermal-Transienten-Messung.*

Vierter Schritt: Auswertung der Messkurve und Umrechnung in die kumulativen Strukturfunktion. Das in der Z_{th}-Messkurve im Foster-Modell komplett abgebildete thermische System wird mit Hilfe einer mathema-

CODICO®

XC9267/68
36V Step Down DC/DC!

• 36V Operating Voltage
• Synchronous operation
• 11,6 µA Quiescent Current
• 105 ˚C Operating Temperature
• 1.8 x 2.0 x 0.6mm Ultra-Small USP-6C Package

TOREX SEMICONDUCTOR LTD.

©thousandsanimals - Fotolia.com

Kontakt: +43 1 86 305–0 | office@codico.com | www.codico.com/shop

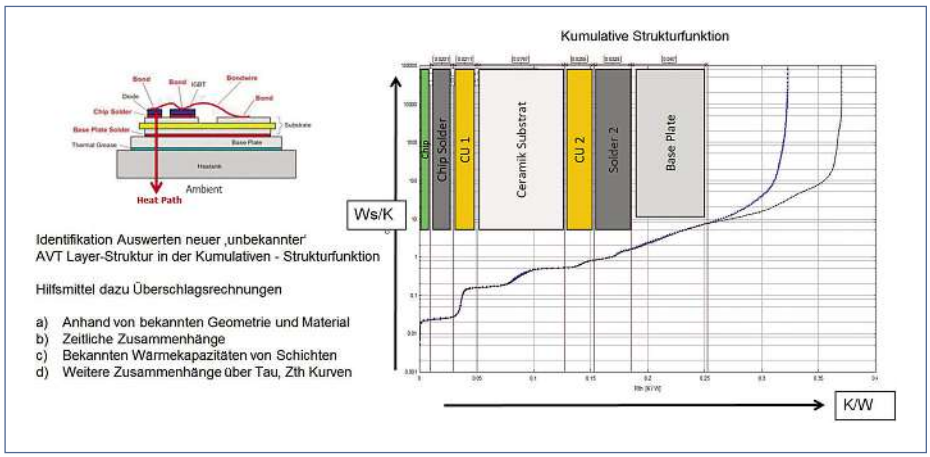


Bild 3: *Identifikation und Auswertung AVT-Layer-Struktur in der kumulativen Strukturfunktion.*

tischen Transformation in das kanonische Cauer-Modell überführt. Die kumulative Strukturfunktion repräsentiert auf der y-Achse die Summe aller Wärmekapazitäten und die Summe aller thermischen Widerstände auf der x-Achse (Bild 2).

Die Interpretation und Auswertung der Strukturfunktionen neuer, unbekannten AVT- Strukturen erfordert zu Beginn einmalige, zusätzliche Arbeiten. Aus dem typischen treppenförmigen Verlauf der kumulativen Strukturfunktion müssen den einzelnen physikalischen Schichten ihre Wärmekapazität und ihr thermischer Widerstand zugeordnet werden. Die Verifikation geschieht hierbei über Hilfsmittel wie Fixpunkte, bekannte Materialien und die Geometrie sowie zeitliche Zusammenhänge. Die Norm JEDEC 51-14 beschreibt eine zweite Messung, mit einer bewusst eingebrachten, bekannten thermischen Störung. Damit lässt sich im Wärmepfad ein eindeutiger Fixpunkt in einer unbekannten Strukturfunktion generieren (Bild 3).

Wird das thermische Transientenverfahren mit dem Lastwechseltest kombiniert, ergeben sich daraus neue, interessante Möglichkeiten der Fehleranalyse. Dazu werden alle thermischen Schichten eines Aufbaus während eines Lastwechseltests zu Zeitpunkten wie 50, 100, 500 oder 1.000.000 Zyklen detailliert charakterisiert und mit ihrem Neuzustand verglichen. Eine Degradation der thermischen Widerstände im direkten z-Pfad zwischen Chip und Coolplate ist bis zu einer Auflösung von 0,01 K/W darstellbar. Rissbildung während der Lastwechseltests im z-Pfad im Bereich der Chip-Lötung, der Substrat-Lötung oder sonstiger TIM-Übergänge zum Kühlkörper sind durch die thermische Transientenmessung direkt zu erkennen. Das gleiche gilt beispielsweise für den Übergang von Kupferlagen zu Keramik-Trägern. Die Degradation einer in der Strukturfunktion bekannten thermischen Schicht wird über den zeitlichen Verlauf durch übereinanderlegen von Kurven zu unterschiedlichen Zeitpunkten sichtbar und bewertbar.

Ein erster Hinweis für eine Degradation überhaupt ist die Änderung des Gesamtwiderstandes des Prüflings über die Zeit. Der genaue Ort der betroffenen thermischen Schicht wird über deren verlängerte Treppenstufe, mit höherem thermischen Widerstandes auf der x-Achse im Vergleich zur Ausgangskurve, deutlich sichtbar und messbar. Da sich thermische Degradation nicht auf die Wärmekapazität einer Schicht auswirkt, bleibt die Höhe einer Treppenstufe (y-Wert) unverändert. Der Kurvenverlauf einer degradierten Strukturfunktion wird sich ab der thermisch degradierten Schicht nach rechts auf der x-Achse verschieben (Bild 4).

Elektrische Verbindungen, wie die Stromversorgung über Bonddrähte oder Clips, die sich teilweise nicht im direkten thermischen z-Pfad befinden, sind über eine Auswertung der Strukturfunktion nicht erkennbar. Sie sind jedoch für die Zuverlässigkeitsbestimmung und die Lastwechseleigenschaften des Leitungshalbleiters ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Die Degradation von Bonddraht-Anbindungen über die Zeit wird während des Lastwechseltests über die Spanungs- und Stromwerte und deren Änderung erkennbar (z.B. V_{ce}, V_{on}, V_{Gate}, I_{Gate}). Einzelne Bonddraht-Liftoffs (Abheber) oder die einer Bonddrahtgruppe, werden durch einen treppenartigen Anstieg der Spannungsmesskurven ersichtlich.

Bisher wurde gezeigt, wie die zeitliche und lastabhängige Degradation thermischer Schichten mit Hilfe einer thermischen Transientenmessung prinzipiell möglich ist. Die gleichzeitige Spannungsmessung liefert zusätzliche Informationen über den Zustand der Bondverbindungen. Für eine Aussage über die Zuverlässigkeit einer speziellen Applikation reicht ein standardisiertes Vorgehen nicht aus. Wichtig sind die Definition eines realitätsnahen Belastungsprofils und eine passende Regelstrategie für die Lastwechselzyklen. Dabei ist der Temperaturhub für den einzelnen Lastwechselzyklus das Schlüsselelement für eine spätere Zuverlässigkeitsbewertung.

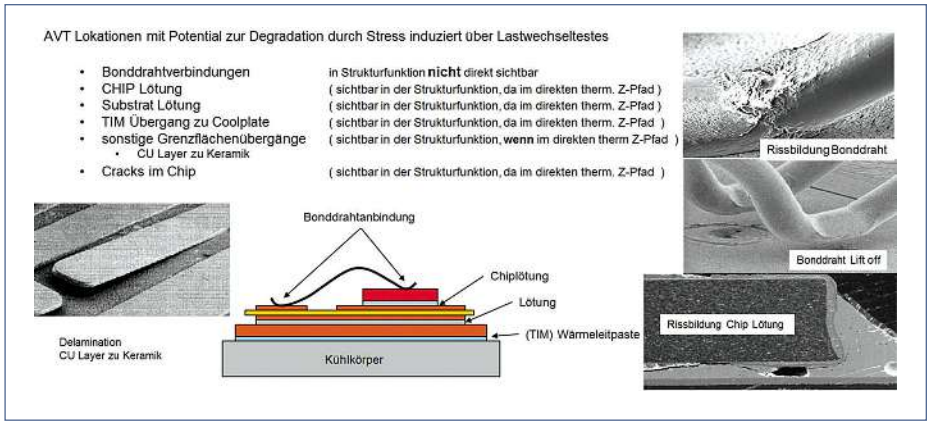


Bild 4: *Ausfallmechanismen.*

Das Temperaturprofil in einzelne Bereiche aufteilen

Den „richtigen" Temperaturhub erreicht man, indem man vom geplanten, realen Lastfall der Gesamtapplikation ein zeitliches Power-Profil ableitet. Als nächster Schritt muss aus diesem Power-Profil ein zu erwartendes Temperaturprofil erstellt werden. Das ist mit Hilfe numerischer Simulation oder durch Berechnungen mit einem RC-Netzwerk möglich. Eine wichtige, zusätzliche Optimierung wird erreicht, in dem das Temperaturprofil in Temperaturbereiche aufgeteilt und deren Häufigkeit gewichtet wird. Durch diese Gewichtung können die Belastungen des Power-Elements mit kleinem Stressfaktor

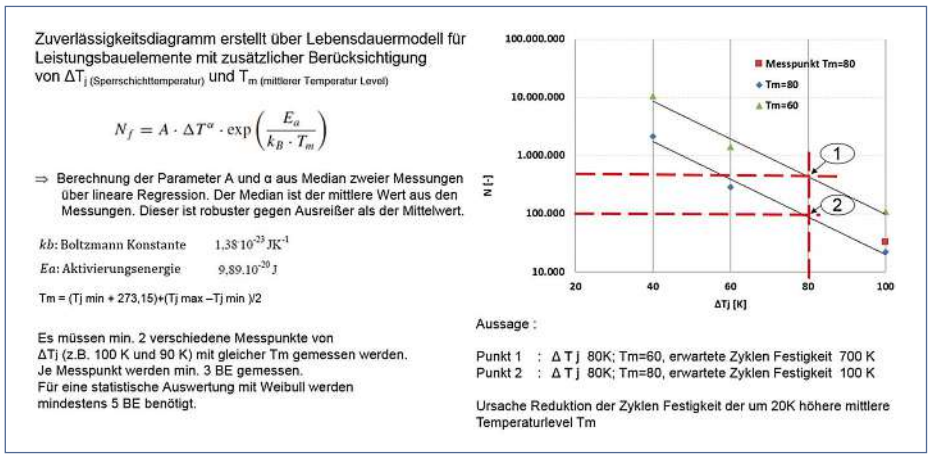


Bild 5: *Zuverlässigkeitsdiagramm.*

ebenso im angepassten Temperaturhub eines Lastwechselzyklus repräsentiert werden, wie kurzzeitige, hohe Spannungsbelastungen. Mit dem angepassten Temperaturhub ist nun die Grundlage für eine aussagekräftige Zuverlässigkeitsabschätzung des Power-Elements gelegt. Eine weitere Herausforderung ist die Durchführung und Kontrolle des Lastwechseltests. Denn hierzu gehört die sorgfältige Auswahl einer geeigneten Regelstrategie .

Die Frage ist dabei, wie die Degradation einer thermischen Schicht des Prüflings während der Prüfzeit von der Testeinrichtung behandelt wird. Die Degradation macht sich zunächst in der Erhöhung der Sperrschichttemperatur bemerkbar. Eine Möglichkeit besteht darin, den Effekt der thermischen Degradation durch Gegenregelung zu kompensieren. Die Sperrschichttemperatur wird dann konstant gehalten, indem die Zykluszeiten, die eingeprägte Leistung oder der Strom nachgeregelt werden. Bei dieser Art der Prüfung wird allerdings der Degradations-Stress realitätsfern abgefedert.

Bei einer anderen Art der Regelung bleiben die Zykluszeiten, die eingeprägte Leistung und der Strom während der gesamten Testdauer unverändert. Bei der Degradation einer Schicht im thermischen Pfad des Aufbaus steigt die Sperrschichttemperatur entsprechend an. Es entsteht ein zusätzlicher mechanischer Stress. Diese Art der Regelung kommt der Realität sehr nahe, da die zusätzliche Temperaturerhöhung zu einer zusätzlichen mechanischen Belastung und einem schnelleren Ausfall führt.

Lebensdaueraussage und Regelstrategie

Die Wahl der Regelstrategie beeinflusst eine Lebensdauerabschätzung signifikant. Zwischen einer geregelten „relaxten“ Variante mit konstanter Sperrschichttemperatur und der stromkonstanten Variante ohne Nachregelung liegt bezüglich der Lebensdauer als Daumenwert der Faktor drei. Eine Lebensdaueraussage muss deshalb immer im Zusammenhang mit der eingesetzten Regelstrategie betrachtet werden. Über das Arrhenius-Modell sowie zusätzlich eingefügter empirischer Faktoren kann mit diesen Ergebnissen bei überschaubarem Testaufwand eine Lebensdauerabschätzung erfolgen. Die Darstellung erfolgt beispielsweise im Zuverlässigkeitsdiagramm (Bild 5). // KU

Zentrum für Wärmemanagement Stuttgart (ZFW)

Dienstleistung von der Idee bis zur Serienreife

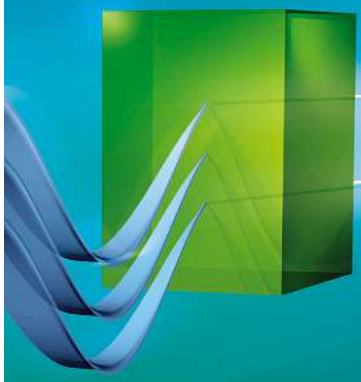
Das Wärme-Management bestimmt nicht nur in der Leistungselektronik die Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Weil jedes Kelvin zählt, ist ein analytisches und systematisches Vorgehen entscheidend. Jedoch sind Mess- und Berechnungsmethoden nur sinnvoll nutzbar, wenn die Physik dahinter verstanden wird. Autor Peter Fink hat über 25 Jahre Berufserfahrung im Bereich Halbleiter, Electronic Packaging und Leiterplatten. Im ZFW verantwortet er u.a. die Entwicklung und Optimierung von Kühlkonzepten, Charakterisierung thermischer Pfade mit dem Transientenverfahren und thermische Simulationsrechnungen.

pcim
EUROPE

Internationale Messe und Konferenz für Leistungselektronik, Intelligente Antriebstechnik, Erneuerbare Energie und Energiemanagement
Nürnberg, 16. – 18.05.2017

»Connecting Global Power

Sie sind Experte, wir bieten die Plattform. Platzieren Sie sich mitten unter hochkarätigen Branchenführern und präsentieren Sie Ihr Know-how.



Werden Sie Aussteller und treffen Sie auf ein kompetentes, internationales Fachpublikum.
pcim.de

Folgen Sie uns auf
#pcimeurope

Informationen:
+49 711 61946-820
pcim@mesago.com

mesago
Messe Frankfurt Group

Thermische Charakterisierung elektronischer Systeme

Die thermische Optimierung erfordert eine präzise Analyse der Wärmepfade. Bauchgefühl und Erfahrung reichen aufgrund gestiegener Systemkomplexität und Anforderungen nicht mehr aus.

ANDREAS GRIESINGER *

Die Zuverlässigkeit und Lebensdauer elektronischer Systeme hängt entscheidend von ihrer thermischen Belastung ab. Design, Größe und Gewicht werden vom Kühlkonzept mit bestimmt. Daraus ergibt sich der Wunsch der Elektronikentwickler, die thermischen Verhältnisse in ihrem Produkt bereits in einer frühen Entwicklungsphase zu verstehen.

Der Traum des Ingenieurs ist ein einfaches Tool, möglichst in Excel, das ein CAD-Modell fehlerfrei einlesen kann. Mit einer einfachen Eingabe will der Entwickler Parameter, wie z.B. Verlustleistungen, Kühlkörpergeometrie oder die Platzierung der Bauelemente selbst variieren. Auf Knopfdruck soll das Programm die Temperaturen, Wärmeströme und Strömungsverhältnisse an allen gewünschten Stellen und Flächen im Gerät liefert. Gerne dürfte noch die zu erwartende Lebensdauer der einzelnen Komponenten ausgegeben werden. Doch ganz so einfach ist die Sache nicht.

Wer Tools zur Berechnung von Temperatur- und Strömungen programmiert, muss die Physik dahinter komplett durchdrungen haben. Für den reinen Anwender genügt es eventuell, für Überschlagsrechnungen die wesentlichen Formeln der Wärmeübertragung parat zu haben. Dazu gehören im Bereich der Wärmeleitung das Fouriersche Gesetz und empirische Gleichungen zur Wärmespreizung. Bei der Wärmeübertragung zwischen einem Festkörper und einem angrenzenden Fluid beschreiben Nusselt-Korrelationen den Wärmeübergang. Im Falle der Wärmestrahlung kann das Stefan-Boltzmann-Gesetz nützlich sein. Allerdings stößt man hier mit der einfachen Handrechnung schnell an seine Grenzen, da beim übertragenen Wärmestrom die Wechselwirkungen aller Flächen, die mit der Wärmequelle in sichtbaren Kontakt sind, zu berücksichtigen ist.

*** Andreas Griesinger**
... leitet den Forschungsbereich Wärmemanagement an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart.

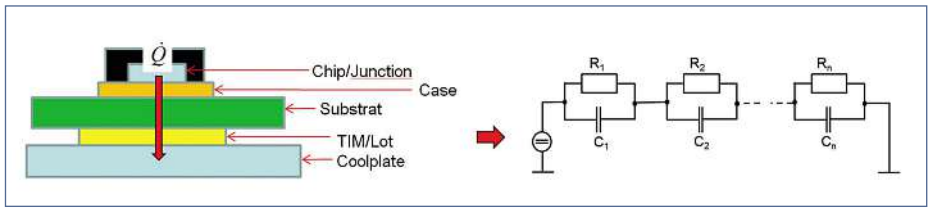
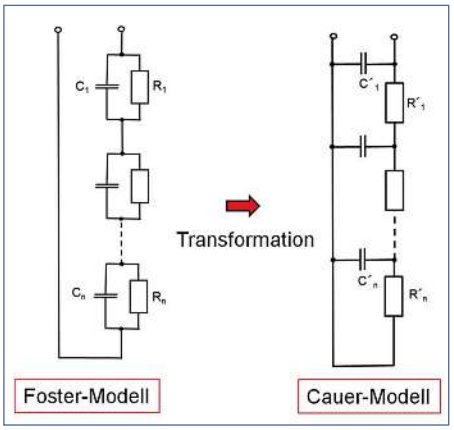


Bild 1: *Modellierung eines elektronischen Systems mit einem einfachen thermischen RC-Netzwerk.*

Eine interessante Möglichkeit für die schnelle Berechnung von Temperaturen in einem elektronischen System ist das Arbeiten mit einem RC-Netzwerk. Dabei wird jede thermisch relevante Schicht im Wärmepfad durch einen thermischen Widerstand R und eine Wärmekapazität C dargestellt (Bild 1).

Sind die thermischen Widerstände und Kapazität im Modell paarweise parallel geschaltet, spricht man vom Foster-Netzwerk. Dieses ist mathematisch einfach zu beschreiben. Das Aufheizen und Abkühlen einer Wärmequelle kann damit im Falle eines eindimensionalen Wärmepfads meist zufriedenstellend beschrieben werden. Allerdings entsprechen die einzelnen R- und C-Werte nicht den Werten der einzelnen Schichten im Aufbau. Das ergibt sich schon daraus, dass die einzelnen Kapazitäten nicht gegen Masse, also die Umgebung, geschaltet sind. Wer allerdings nicht nur den thermischen Widerstand des gesamten Wärmepfads modellieren, sondern mit R- und C-Werten arbeiten will, die den realen Schichten im Aufbau entsprechen, muss das Foster- in ein Cauer-Netzwerk transformieren (Bild 2). Die Beschreibung dazu liefert z.B. die Jedec-Norm JESD51-14.

Das zeitliche Verhalten eines eindimensionalen Wärmepfads lässt sich im Foster-Modell mit einer Summe von Exponentialfunktionen beschreiben. Auf einen einfachen Powerstep ΔP reagiert das System mit einem exponentiellen Temperaturanstieg (Bild 3). Eine zeitlich andere Anregung als ein Powerstep, beispielsweise eine Folge von Rechteckimpulsen, lässt sich leicht durch die Überlagerung zeitlich versetzter Powersteps mit angepasster Leistung ΔP_i abbilden. Dabei



Bilder: Zentrum für Wärmemanagement Stuttgart

Bild 2: *Die Foster-Cauer-Transformation.*

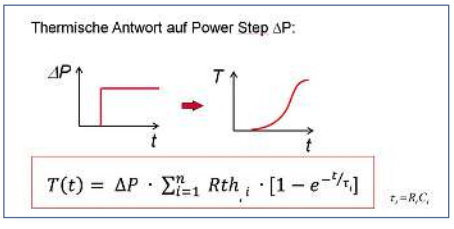


Bild 3: *Thermische Antwort eines eindimensionalen Wärmepfades beschrieben durch ein Foster-Modell mit n-Gliedern.*

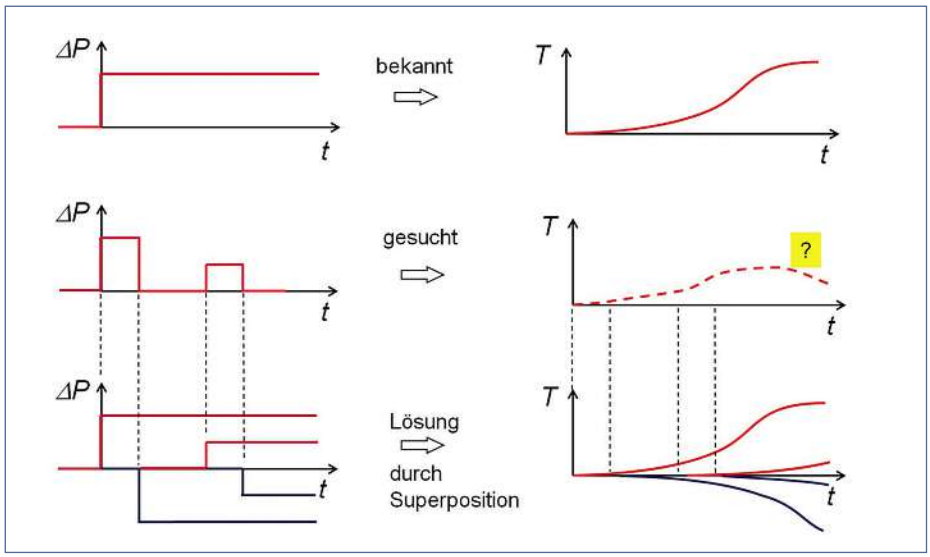


Bild 4: *Berechnung der thermischen Antwort auf eine Folge von Rechteckimpulsen durch die Superposition von Powersteps.*

kann ΔP_i auch negative Werte annehmen (Bild 4).

Im Fall des eindimensionalen Wärmepfads kann dies mit überschaubarem Aufwand z.B. in Excel programmiert werden. Für die Berechnung komplizierterer, mehrdimensionaler RC-Netzwerke empfehlen sich grafikorientierte Programme. Der Anwender baut sich sein RC-Netzwerk per Drag&Drop am Bildschirm auf und definiert die Rand- und Anfangsbedingungen. Die Herausforderung ist dabei, die realen Wärmepfade im elektronischen System und deren Wechselwirkung im Modell richtig abzubilden. Die Validierung des Modells durch den Vergleich mit Messergebnissen ist Pflicht. Numerische Berechnungsmethoden sind gegenüber der Berechnung mit RC-Netzwerken genauer, allerdings auch langsamer. Die numerische Berechnung des Auf- und Abkühlens komplexer elektronischer Systemen kann auch heute noch mehrere Tage dauern.

Das Fazit lautet: Numerische Temperatur- und Strömungsberechnung ist heute beim Wärmemanagement in der Elektronik Stand der Technik – auch bei kleinen und mittelständischen Unternehmen. In vielen Fällen ist ein auf die Anwendung abgestimmtes, RC-Netzwerk-basiertes Berechnungstool eine sinnvolle Ergänzung. Eine große Variantenvielfalt lässt sich damit fast auf Knopfdruck thermisch bewerten.

Wer sein Berechnungsmodell, egal ob analytisch oder numerisch, mit falschen Werten füttert, darf keine brauchbaren Ergebnisse erwarten. Für die Berechnung der zeitabhängigen Temperaturen und Strömungen in der Elektronik muss für jedes Material neben seinen Abmessungen die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität, die Dichte, der Emissions- und Absorptionsgrad der zum Fluid zeigenden Oberflächen und die Viskosität des Fluids bekannt sein. Dazu kommen noch die Einbaulage, eventuell aufgeprägte Luftströmungen und die Solarstrahlung. Eine besondere Herausforderung sind die thermischen Übergangswiderstände: Berühren sich im Wärmepfad zwei Festkörper, entsteht an ihrer Kontaktfläche ein thermischer Übergangswiderstand. Kleinste Lufteinschlüsse auf Grund der Oberflächenrauheit werden für den Wärmestrom zum Hindernis. Leider sind die Übergangswiderstände messtechnisch schwer zu erfassen. Sie hängen von vielen Faktoren ab, wie Rauheit und Härte der beiden Oberflächen, Gestaltsabweichungen höherer Ordnung oder dem mechanischen Anpressdruck. Oft sind sie der Flaschenhals im Wärmepfad.

Für die Messung der Materialeigenschaften stehen viele Methoden zur Verfügung. Neben vielen Exoten haben sich in der Branche der Elektronikkühlung drei etabliert: Die stationäre Zylindermethode nach ASTM D5470-12, das Laser-Flash-Verfahren nach ASTM E1461 und das Thermische Transientenverfahren nach JEDEC JESD51-14.

Die stationäre Zylindermethode

Eine Möglichkeit für die präzise Bestimmung des thermischen Widerstands von Festkörpern, Elastomeren und Pasten, wie z.B. thermische Interface-Materialien (TIM), ist die stationäre Zylindermethode nach ASTM D 5470-12. Dabei wird die Probe zwischen zwei Zylinder geklemmt (Bild 5). Durch Beheizen des oberen Zylinders und Kühlen

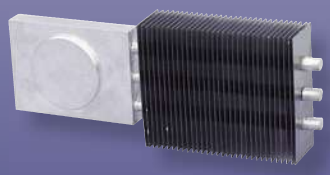
dau
A Miba Group Company
www.dau-at.com

IHR SPEZIALIST FÜR SCHEIBENZELLEN KÜHLUNG

LUFTKÜHLUNG

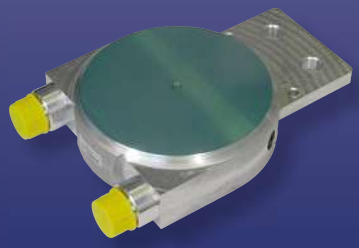
• Sehr stabile Ausführung für hohe Spannkräfte

HEATPIPEKÜHLUNG



• Niedriger thermischer Widerstand

FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG



• Viele Standardausführungen für alle Größen von Scheibenzellen

dau - AUSTRIA
DAU GmbH & Co KG
Tel: +43 (0) 31 43 / 23 51 - 0
office@dau-at.com
www.dau-at.com

dau - SÜD
+49 1515/8498140
herbert.reisser@dau-at.com

dau - NORD
Tel +49 (0) 60 83 / 94 11 10
frank.ott@dau-at.com

des unteren Zylinders entsteht ein Wärmestrom durch die Probe. Mit dünnen Thermoelementen wird der Temperaturabfall entlang des Wärmepfads gemessen. An der Stelle der Probe ergibt sich ein Temperatursprung. Der Quotient aus Temperatursprung und Wärmestrom liefert den Rth-Wert der Probe, also deren thermischen Widerstand. Wer die Wärmeleitfähigkeit der Probe wissen will, muss noch die Probendicke messen. Das klingt einfach. Doch für zuverlässige Messergebnisse braucht es noch viel Detailarbeit. Zwei Zylinderflächen mit 30 mm Durchmesser planparallel auszurichten, ist nicht trivial. Schon ein effektiver Spalt von 1 µm zwischen den Zylinderflächen wäre das Ende einer brauchbaren Messung.

Der Abstand zwischen den Zylindern, also die Probendicke, sollte während der Messung kontinuierlich mikrometergenau erfasst werden. Speziell bei thermischen Interface-Materialien ist das Fließverhalten der Proben bei definiertem, anliegendem Druck eine äußerst hilfreiche Information. Übrigens ist auch die umgekehrte Messung spannend: Wie relaxiert das Material mit der Zeit, wenn ich seine Probendicke konstant halte? Prinzipiell liefert die stationäre Zylindermethode als erste Größe den thermischen Widerstand der Probe, inklusive der beiden Grenzflächenwiderstände zu den Messzylindern. Besonders bei dünnen, harten Proben, wie etwa Kaptonfolie, können die Übergangswiderstände einiges höher liegen als die Bulk-Werte des Materials selbst. Wer Datenblattwerte vergleicht, sollte sich deshalb im Klaren sein, ob die Wärmeleitfähigkeit, also der reine Bulk-Wert, oder die effektive Wärmeleitfähigkeit angegeben ist. Diese beinhaltet den Bulk-Wert und beide Übergangswiderstände an den Grenzflächen.

Bild 5: *Neueste Generation der stationären Zylindermethode (TIM-Tester), wie sie beim ZFW Stuttgart entwickelt wurde und im Einsatz ist.*

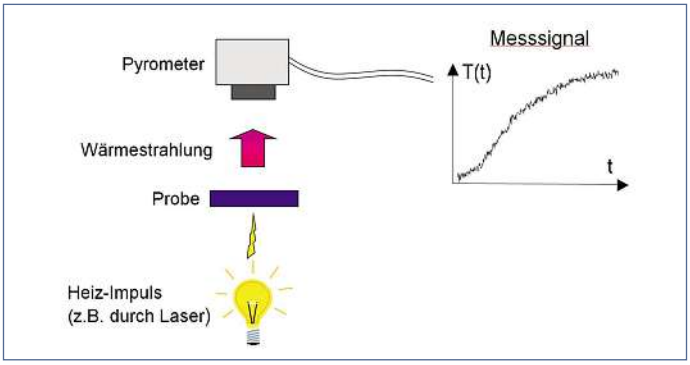


Bild 6: *Das Prinzip der Laser-Flash-Methode.*

Vollständig kontaktlos: die Laser-Flash-Methode

Die Temperaturleitfähigkeit eines Festkörpers, beispielsweise einer Leiterplatte, kann mit der Laser-Flash-Methode nach ASTM E1461 bestimmt werden. Dabei wird die Unterseite eines Probenplättchens mit einem Laserblitz erwärmt und mit einem Pyrometer die thermische Antwort auf der Oberseite gemessen (Bild 6). Die übliche Probengeometrie liegt in der Größenordnung von 10 mm x 10 mm. Die Dicke sollte abhängig von den Wärmeleiteigenschaften der Probe im Bereich 0,5 mm bis 2 mm gewählt werden. Das Verfahren arbeitet vollständig kontaktlos. Damit erspart sich der Ingenieur jegliche Diskussion über Übergangswiderstände: Die Methode liefert den reinen Bulk-Wert. Allerdings sind damit auch keine Messungen unter mechanischem Druck möglich. Ein thermisches Interface-Material im verpressten Zustand, wie es etwa bei Silikonfolien häufig gewünscht ist, lässt sich mit der Laser-Flash-Methode also nicht charakterisieren. Je nach Gerät können Temperaturen vom negativen Celsius-Bereich bis ein paar hundert Grad problemlos vollautomatisch abgefahren werden. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit einer Probe als stationäre Größe müssen zur gemessenen Temperaturleitfähigkeit zusätzlich noch die Dichte und die spezifische Wärmekapazität bestimmt werden. Die Dichte ist am genauesten mit einer Präzisionswaage nach der Auftriebsmethode zu messen, die spezifische Wärmekapazität mit der dynamischen Differenzkalorimetrie.

Das thermische Transientenverfahren

Das thermische Transientenverfahren nach JEDEC JESD51-14 ermöglicht den thermischen Pfad eines Halbleiters von dessen Junction bis zur Umgebung zerstörungsfrei zu charakterisieren. Dazu wird der Halbleiter mit konstanter Leistung PH vom Zeitpunkt t = 0 s mit einer Stufenfunktion beheizt. Alternativ dazu kann die Abkühlkurve betrachtet werden. Die Halbleiterstruktur dient als Heizquelle und zugleich als Temperatursensor. Die Erwärmung wird mit Hilfe des Spannungsabfalls gemessen. Durch Kalibrierung des Halbleiters im Wärmebad kann aus der gemessenen Spannung direkt die zeitabhängige Erwärmung, d.h. die Z_{th}-Kurve berechnet werden. Gemessen wird in der Regel im logarithmischen Zeitmaßstab mit anfänglicher Sampling-Rate im Mikrosekundenbereich. Damit lassen sich selbst die feinen Strukturen im Chip-Inneren, z.B. Klebe- oder Lotschichten, präzise charakterisieren. Das Ergebnis ist die Strukturfunktion als Abbild des realen Wärmepfades. Sie liefert für jede Schicht im eindimensionalen Pfad die Wärmekapazität und den thermischen Widerstand. Bei bekannten Abmessungen der Schicht lässt sich aus dem thermischen Widerstand dessen Wärmeleitfähigkeit berechnen. Der Vorteil des thermischen Transientenverfahrens ist, dass die gesamten Wärmepfade im realen Aufbau gemessen werden können. Das System muss für die Probenpräparation nicht zerstört werden. Bezüglich der Stoffwerte der einzelnen Materialien im Wärmepfad geht das jedoch auf Kosten der Genauigkeit. // **KU**

Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

NETZTEILE

Lüfterlos für Medical und ITE

Günter Power Supplies hat konvektionsgekühlte, modulare Netzteile ins Portfolio aufgenommen. Die CoolX-600-Serie von Excelsys ist individuell konfigurierbar und bietet eine echte Konvektions-Ausgangsleistung von 600 W ohne zusätzliche Kühlung. Das Grundgerät mit aktiver PFC eignet sich für alle Einsatzbereiche, auch für den Betrieb an mobilen Netzen, und fängt Überspannungen bis 300 V für 5 s und 4 kV Surge-Impulse ab. Darüber hinaus bietet das Gerät einen 24-W-Standby-Ausgang (5 bzw. 12 V alternativ), vier galvanisch getrennte Ausgangsmodule (manuell, analog und digitalkonfigurierbar), zwei Netzsicherungen, einen Wirkungsgrad von >93%, hohe Zuverlässigkeit (MTBF >400.000 h), niedrigen Erdableitstrom <300 µA (optional auch <150 µA sowie Isolationsstrecken in Patientenschutz Ausführung (MOPP, Body Float BF Rating). Die vier verschiedenen Modul-Typen (CoolMods) mit 105 – 200 W Ausgangsleistung können sowohl parallel als auch in Serie betrieben werden. Für anspruchsvolle Fälle gibt es Modelle, die dank spezieller Beschichtungen und verstärktem Vibrationsschutz auch harten Einsatzbedingungen trotzen (MIL810G, MIL461G).

Günter Power Supplies

NETZTEILMODULE

Für die Leiterplattenmontage

Emtron bietet die Stromversorgungsmodule der Baureihe IRM-45/60 von Mean Well an, die für die direkte Montage auf der Leiterplatte elektronischer Geräte konzipiert sind. Damit wird die Produktfamilie IRM auf den Leistungsbereich bis 60 W erweitert. Das kompakte Design und die niedrigen Leerlauf-Leistungsaufnahme der IRM-Familie von weniger als 0,1 W hilft Entwicklern viele konstruktive Probleme zu lösen, die aus dem oft knappen Bauraum auf Leiterplatten resultieren. Zudem erfüllen diese Stromversorgungen mit Leichtigkeit die strengen Anforderungen der aktuellen Energieeffizienz-Richtlinien weltweit. Und darüber hinaus bieten sie mit ihrer Stoßfestigkeit von 5 G eine hohe mechanische Robustheit. Die Baureihe IRM-45/60 lässt sich über Anschlussstifte in die Leiterplatte einlöten; mit der Ausführung IRM-45/60-xST steht auch eine Modell mit Schraubanschlüssen zur Verfügung. Ihre Eigenschaften machen die Produkte der IRM-Familie zur idealen Stromversorgung für Industrieelektronik, Mobil- und Handheld-Geräte. Zu beziehen ist die IRM-Familie über den Spezialdistributor Emtron electronic.

Emtron

DIPIPM+-Modul-Baureihe für Kompakt-Umrichter

Alle IPMs der neuen DIPIPM+-Baureihe integrieren Gleichrichter, Bremssteller und Wechselrichter. Optimierte IGBT- und FWDi-Chips mit HV- und NV-ICs sind auf einem gemeinsamen Leadframe assembliert.

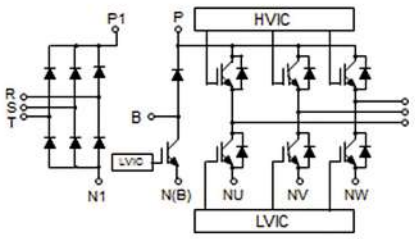
MUZAFFER ALBAYRAK; ECKHARD THAL; KOSUKE YAMAGUCHI, TERUAKI NAGAHARA *

Der Trend zur Miniaturisierung von Umrichtern ist ungebrochen. Welche Möglichkeiten bieten sich beim Entwickeln neuer kompakter Umrichter an und wie lassen sich gleichzeitig die Kosten des Designs reduzieren? Als Antwort auf diese zentralen Fragen stellt Mitsubishi Electric die DIPIPM+-Baureihe vor [1]; [2]. Die Modulserie gibt es mit sechs verschiedenen Nennströmen in zwei auswählbaren Konfigurationen: Gleichrichter-Bremssteller-Wechselrichter-Topologie (Bild 1) oder Gleichrichter-Wechselrichter-Topologie (Bild 2). Beide Leistungsmodule tragen das gleiche, kompakte Dual-Inline-Gehäuse.

Den Überblick über die implementierten Funktionen des DIPIPM+ [2] gibt das Blockdiagramm in Bild 4: Die p-seitigen IGBTs werden über ein Hochvolt-IC mit Eingangs-Signalaufbereitung, Level-Shifter und Unterspannungs-Schutz angesteuert. Aus einer einzelnen externen 15-V-Versorgung wird die Ansteuerleistung für die p-seitigen IGBTs über integrierte Bootstrap-Dioden und Widerstände bereitgestellt; die n-seitigen IGBTs über ein Niedervolt-IC mit Eingangs-Signalaufbereitung, Kursschluss-Schutz und Unterspannungs-Schutz. Das LVIC besitzt außerdem einen präzisen analogen Temperatur-Signalausgang VOT und eine Fehlerrückmeldung Fo im Falle des Auslösens einer Schutzfunktion.

Bei der Entwicklung eines neuen Umrichters für den allgemeinen Industrieeinsatz liegt ein Schwerpunkt des Interesses stets auf der Reduzierung der Gesamtkosten. Diese setzen sich zusammen aus den Entwicklungskosten, Materialkosten und Herstellungskosten. Für jeden dieser Kostenfaktoren bietet die neue DIPIPM+-Baureihe interessante Lösungen.

Part Number	Module Rating
PSS05MC1FT	5A / 1200V
PSS10MC1FT	10A / 1200V
PSS15MC1FT	15A / 1200V
PSS25MC1FT	25A / 1200V
PSS35MC1FT	35A / 1200V
PSS50MC1F6	50A / 600V



Bilder: Mitsubishi Electric

Bild 1: *Die neue DIPIPM+-Baureihe ist die Antwort auf Einsatz-Anforderungen an die Leistungshalbleiter in kompakten 400-V-Umrichtern im Leistungsbereich von 0,75 bis 5,5 kW.*

Part Number	Module Rating
PSS05NC1FT	5A / 1200V
PSS10NC1FT	10A / 1200V
PSS15NC1FT	15A / 1200V
PSS25NC1FT	25A / 1200V
PSS35NC1FT	35A / 1200V
PSS50NC1F6	50A / 600V

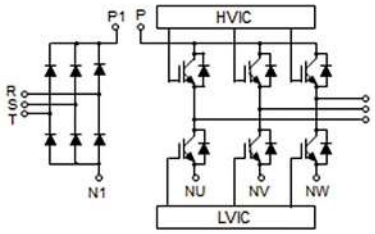


Bild 2: *DIPIPM+TM ohne Bremssteller.*

Entwicklungskosten und Design-Zeit verringern

DIPIPM+ ist ein All-in-One-Umrichtermodul, welches aus einem dreiphasigen Eingangsgleichrichter, einem Bremssteller und einem dreiphasigen Ausgangswechselrichter besteht und alle wichtigen Gate-Treiber- sowie Schutzfunktionen vereint (Bild 4). Um die Entwicklungskosten (und insbesondere die Entwicklungszeit) zu reduzieren, wurde eine Plug-and-Play-Testplatine [3] entwickelt (Bild 5). Diese Testplatine enthält alle notwendigen peripheren Komponenten, um einen Umrichter-Prototypen mit DIPIPM+ schnell zu realisieren: den Snubber-Beschaltungskondensator, die (nicht isolierte) Schnittstelle zum Mikrocontroller, Shunt-Widerstände zur Erfassung der n-seitigen Emitter-Ströme, Komparatoren zum Überstrom-Schutz, Bootstrap-Kondensatoren für die p-seitigen IGBTs, einen Einschaltstrombegrenzer für die Zwischenkreisaufladung und zahlreiche Testpunkte zur Signalerfassung. Einen einfachen Versuchsaufbau mit der DIPIPM+Testplatine zeigt Bild 6.

Der AC-Netzanschluss, Bremswiderstand, Motor, Zwischenkreis-Kondensator, die Ansteuer-MCU und 15-V-Versorgung werden über Klemmen (CON1...CON5) angeschlossen. Die einzige Komponente, die sich auf der

*** Muzaffer Albayrak**
... ist Senior Business Development Engineer Power Semiconductors bei Mitsubishi Electric, Ratingen.

Eckhard Thal
... ist Chief Engineer Power Semiconductors.

Kosuke Yamaguchi
... ist OJT Engineer Power Semiconductors.

Teruaki Nagahara
... ist Application Engineer in Power Device Works Section B bei Mitsubishi Electric, Fukuoka/Japan.

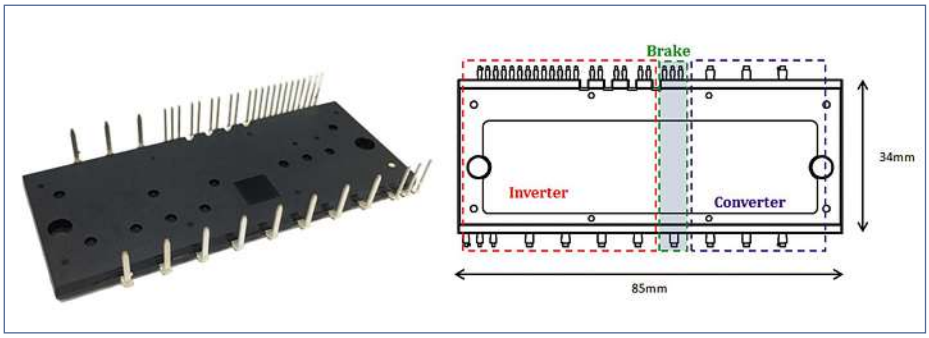


Bild 3: *DIPIPM+-Dual-Inline- Gehäuse mit Abmessungen.*

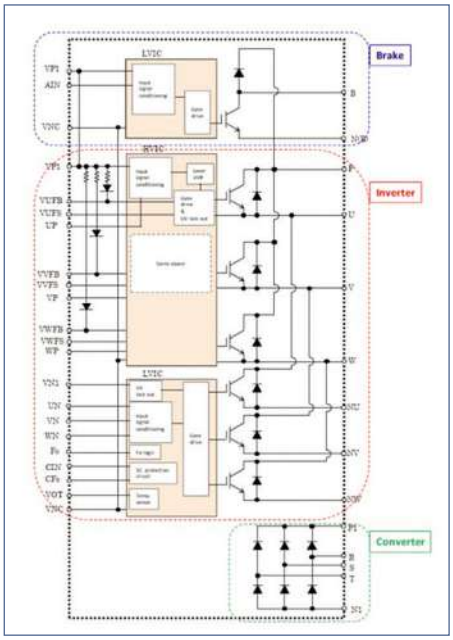


Bild 4: *DIPIPM+-Blockdiagramm*

Leitplattenunterseite befindet, ist das DIPIPM+. So kann schon mittels eines solchen ersten Prototyp-Aufbaus die passende Kühlkörperstruktur experimentell im realen Umrichter-Betrieb ermittelt werden. Da der Kühlkörper insbesondere bei Kompakt- oder Einbau-Umrichtern eine die gesamte Gerätekonstruktion bestimmende mechanische Komponente ist, kann die frühzeitige experimentelle Verifizierung des passenden Kühlkörpers helfen, die Entwicklungszeit zu verkürzen.

Betrachtungen zur Reduktion der Materialkosten

Nun sollen sechs Szenarien (A bis F) zur Reduzierung von Materialkosten durch den Einsatz des DIPIPM+ skizziert werden.

Fall A: Nur eine externe +15-V-Spannungsquelle wird benötigt, aus welcher der HVIC über integrierte Bootstrap-Dioden und -Widerstände versorgt wird. Da der Mikrocontroller auf n-Potenzial des DC-Zwischenkreises arbeitet und die p-seitigen IGBT über Level-Shifter im HVIC ansteuert werden, ist keine galvanische Isolierung zwischen Hochvolt- und dem Niedervolt-Ansteuerung im Umrichters notwendig. So können die Kosten für separate, galvanisch isolierte +15-V-Spannungquellen und Signalisolierung für jeden einzelnen IGBT-Kanal vermieden werden. Nur drei Bootstrap-Kondensatoren müssen auf der Leiterplatte hinzugefügt werden, um die Ansteuerleistung für die p-seitigen IGBTs bereitzustellen. Unter Verwendung dieser Technologie muss die sichere galvanische

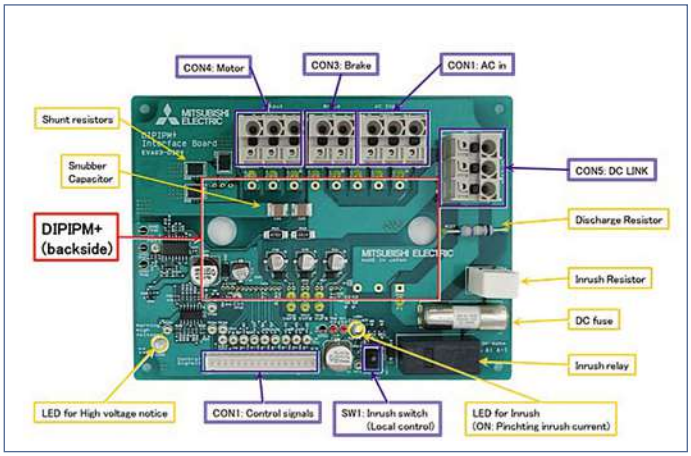
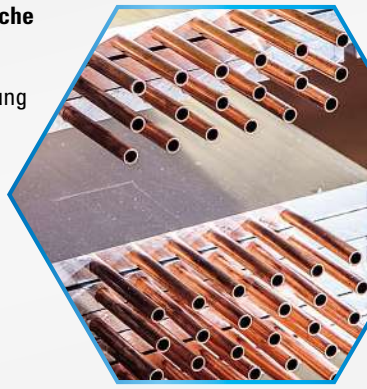


Bild 5: *DIPIPM+-Testplatine; die Position des DIPIPM+ auf der Rückseite der Leiterplatte ist rot gekennzeichnet.*

Kompetenz in Technik.

FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG
kundenspezifische Lösungen

Hohe Kühlleistung durch eingearbeitete Kupfer- oder Edelstahl Innenrohre.



HOCHLEISTUNGS-KÜHLKÖRPER
feinverrippt

Variable Breiten durch modernste Reibschweiß-technik.

BLAUE TECHNIK
elektrische Isolation

Potentialtrennung und hoch wärmeleitend mit 1W/mK.

austerlitz electronic gmbh

austerlitz electronic GmbH
Ludwig-Feuerbach-Straße 38
D-90489 Nürnberg

Telefon: +49 (0)9 11/5 97 47-0
Telefax: +49 (0)9 11/5 97 47-89
E-Mail: info@austerlitz-electronic.de
Internet: www.austerlitz-electronic.de

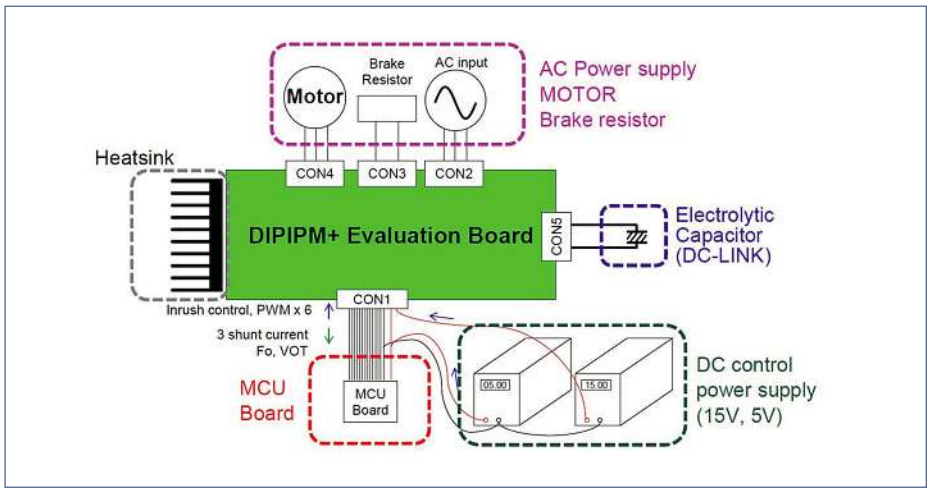


Bild 6: *Versuchsaufbau mit der DIPIPM+-Testplatine.*

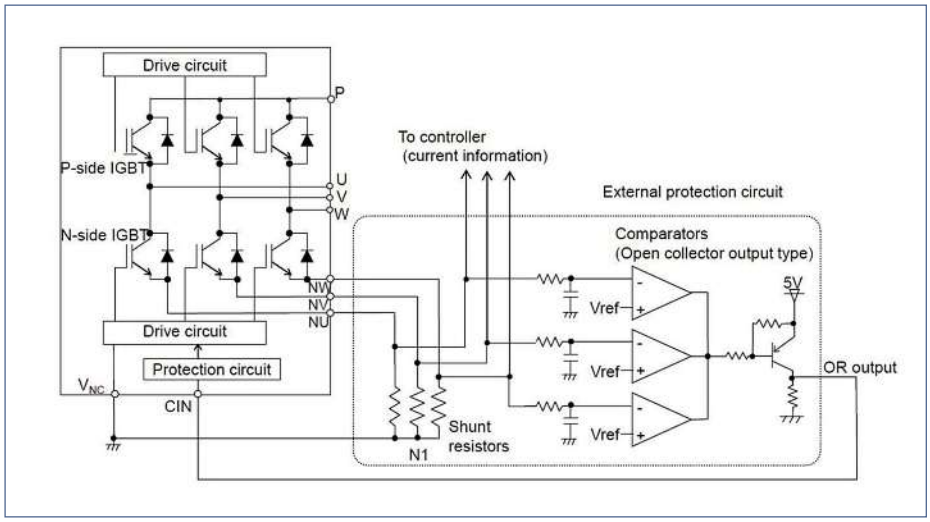


Bild 7: *Nutzung von Emitter-Shunts zum SC-Schutz und zur Phasenstrom-Messung.*

Trennung an der Mensch-Maschine-Schnittstelle (d.h. zwischen dem Bedien-Interface und dem Umrichter-Leistungsteil) vorgenommen werden. Das ist kostengünstiger als dies für jeden einzelnen IGBT-Kanal separat durchzuführen.

Fall B: Zur Realisierung einer Vektor-Control-PWM müssen die Momentan-Werte des Phasenstroms im Umrichter-Ausgang erfasst werden. Dies kann kostengünstig durch Emitter-Shunts in jeder Phase erfolgen, indem man die offenen n-seitigen Emitter des DIPIPM+ benutzt. Diese Shunt-Signale lassen sich darüber hinaus auch verwendet, um den Kurzschluss-Schutz des DIPIPM+ auszulösen (Bild 7). Das Verwenden der Emitter-Shunts vermeidet höhere Kosten für einzelne AC-Stromsensoren in jeder Ausgangsphase des Umrichters.

Fall C: Neue Umrichter-Geräte müssen den EMV-Anforderungen gemäß EN61800-3 genügen. Zu diesem Zweck werden entweder externe oder Umrichter-integrierte EMV-Filter benutzt. Die Kostenreduzierung dieses EMV-Filters ist ein effizienter Weg, die gesamten Kosten des Umrichter-Systems zu minimieren.

Bild 8 zeigt den Vergleich der Störemission des DIPIPM+ im Vergleich zur vorherigen IPM-Generation (Version 4 DIPIPM) im realen Umrichter-Betrieb. Aufgrund der reduzierten Störabstrahlung des neuen DIPIPM+ kann eine beachtliche Reduzierung des EMV-Filteraufwands erreicht werden.

Fall D: Die wohlüberlegte Pin-Belegung des DIPIPM+ gestattet die niederinduktive Kopplung des Zwischenkreiskondensators mittels einer DC-Sandwich-Struktur. Zudem ermöglicht die Pin-Belegung des Dual-Inline-Gehäuses eine einfache räumliche Trennung der Signal- und Leistungsanschlüsse auf der Leiterplatte (Bild 9) und somit ein kompaktes und damit kostengünstiges Leiterplatten-Design.

Fall E: Das Gehäuse des DIPIPM+ ist für alle Modul-Nennströme zwischen 5 und 35 A/1200 V gleich. Durch diesen weiten Strombereich im gleichen Dual-Inline Gehäuse ist es möglich, die gleiche Leiterplatte für verschiedene Umrichter-Leistungen einzusetzen. Die dadurch erreichbare Reduzierung der Vielfalt an Leiterplatten- bzw. Umrichter-Baugrößen eröffnet eine weitere Möglichkeit, die Materialkosten zu minimieren.

Fall F: Das All-In-One-Konzept der DIPIPM+ halbiert den Platz für den dreiphasigen Ausgangswechselrichter im Vergleich zum aktuellen 1200-V-DIPIPM (Bild 10). In Kombination mit optimierten verlustarmen IGBT- und FWDi-Chips führt dies zu einer beachtlichen Reduzierung der Größe des Kühlkörpers und dabei zu verringerten Abmessungen des Umrichtergehäuses an sich. Die Kosten für mechanische Teile im gesamten Aufbau des Umrichters können so verringert werden.

So lassen sich die Herstellungskosten senken

Die hohe Integrationsdichte des DIPIPM+ senkt die Anzahl der benötigten Einzelkomponenten drastisch. Verglichen mit einem Umrichter-Design, welches herkömmliche 7in1-IGBT-Module mit separaten Treiber-ICs und einem dreiphasigen Eingangsgleichrichter-Modul verwendet, wird die Anzahl der Komponenten auf der Leiterplatte um etwa die Hälfte reduziert, was wiederum zu einer erheblichen Senkung der Herstellungskosten für die Leiterplatte führt.

Ein weiterer Aspekt zur Kostenreduzierung ist der einfache Prozess beim Schwall-Löten des DIPIPM+ auf die Leiterplatte. Da die Wechselrichterbrücke, der Bremssteller und der Eingangsgleichrichter in dem gleichen Modulgehäuse integriert sind, muss während des Lötens kein besonderes Augenmerk auf die Höheneinstellung zur Distanz-Kontrolle zwischen der Leiterplatte und dem DIPIPM+-Gehäuse gelegt werden; einfache Abstandshalter sind ausreichend.

Deutlich komplizierter ist es, wenn zum Beispiel zwei separate Leistungsmodule als Wechselrichter und Eingangsgleichrichter auf der gleichen Leiterplatte angeordnet werden: In diesem Fall ist eine individuelle Höhenkontrolle für jedes Modul während des Lötens notwendig, um sicherzustellen, dass sich ein gleich großer Abstand zwischen der Leiterplatte und den beiden Modul-Bodenplatten einstellt, um so bei der nachfolgenden Kühlkörpermontage einen guten thermischen Kontakt beider Module mit dem Kühlkörper sicherzustellen.

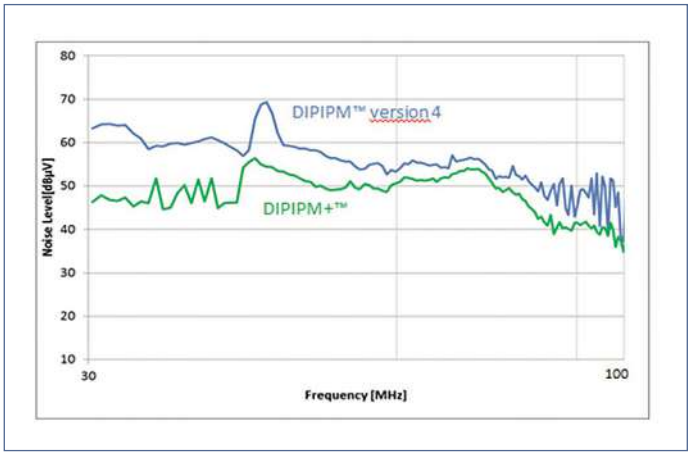


Bild 8: *Störemission des DIPIPM+ im Vergleich zur vorherigen Generation Version 4 DIPIPM.*

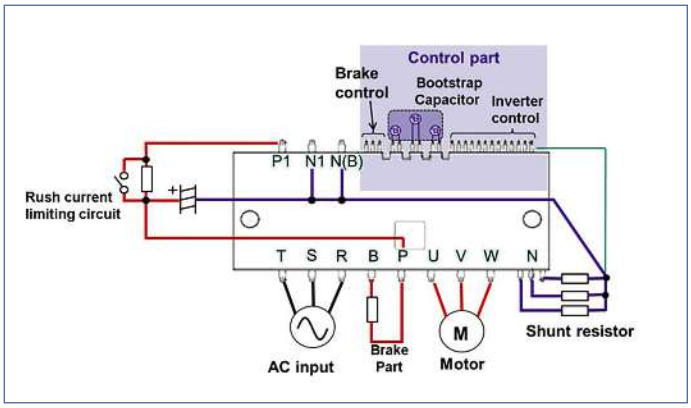


Bild 9: *Zuordnung der Anschlüsse des DIPIPM+.*

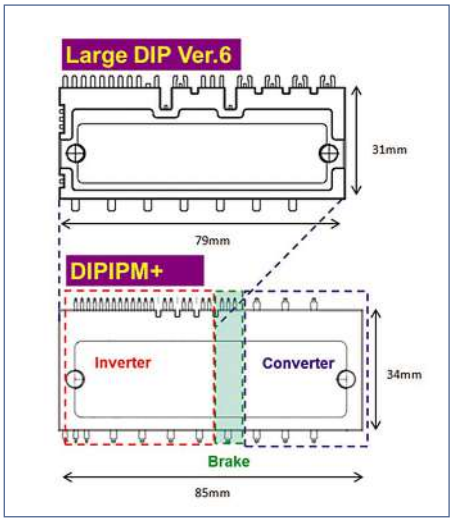


Bild 10: *3-phasiger Wechselrichter im Large-DIPIPM-Gehäuse im Vergleich zum DIPIPM+.*

Miniaturisierung und Erhöhung der Leistungsdichte

Die Kompaktheit des Umrichters ist ein zweites Hauptziel, welches bei der Entwicklung eines neuen Umrichters angestrebt wird, da die Leistungsdichte (kVA/dm³) eines der Hauptkriterien beim Vergleich von Umrichtern verschiedener Hersteller ist. Grundsätzlich sind die meisten der zuvor diskutierten Aspekte zur Reduzierung der Materialkosten in ähnlicher Weise auch für die Erhöhung der Leistungsdichte eines Umrichters relevant: Nutzung der Bootstrap-Technologie für die Versorgung der Ansteuerleistung der p-seitigen IGBT, ersetzen des Ausgangsstromsensors des Wechselrichters durch Emitter-Shunts, reduzieren der EMI-Filter-Größe (sehr kompaktes Leiterplatten-Design), reduzieren der Kühlkörpergröße.

Neben dem Einsatz in Kompakt-Umrichtern ist das DIPIPM+ auch eine interessante Lösung, wenn der Umrichter in einen vorher festgelegten, eingeschränkten Platz eingebaut werden soll, etwa bei motorintegrierten Umrichtern (Klemmkasten-Umrichter). Für derartige Anwendungen bietet die hohe Integrationsdichte der DIPIPM+-Serie erhebliche Vorteile, da sie sehr platzsparende konstruktive Lösungen ermöglicht.

Steigerung der Umrichter-Performance

Der zulässige Umrichter-Ausgangsstrom Io(rms) für verschiedene DIPIPM+-Modultypen ist in Bild 11 für unterschiedliche PWM-Trägerfrequenzen fc berechnet, wobei angenommen wird, dass ΔT(j-c)=25 K, Vcc=600V;

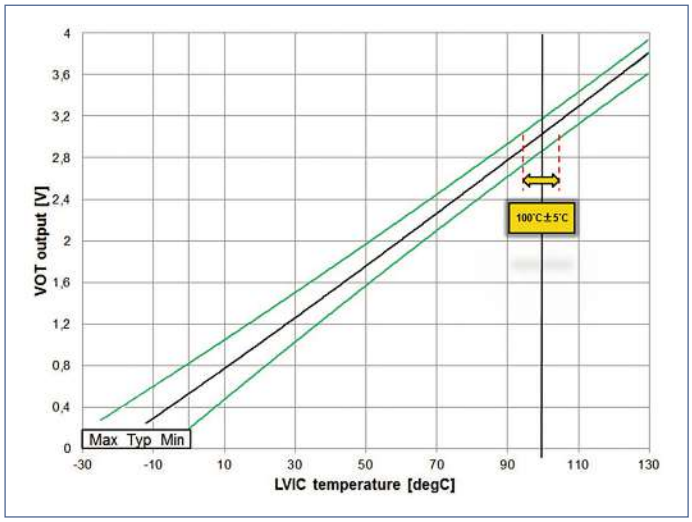


Bild 11: *Umrichter-Ausgangsstrom Io(rms) und PWM-Trägerfrequenz fc.*

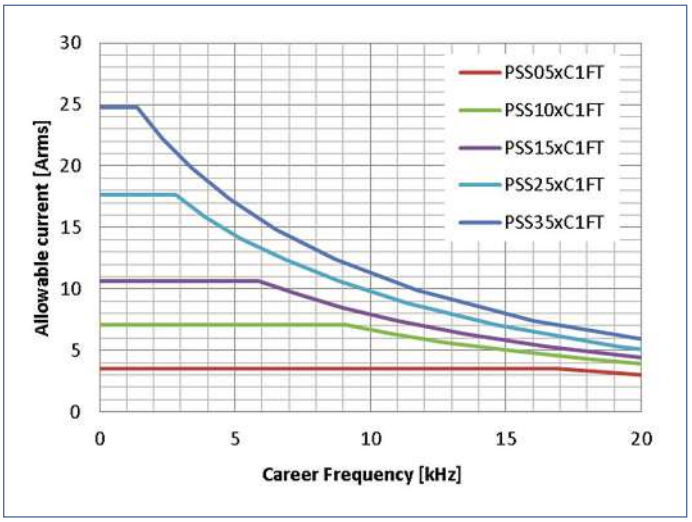


Bild 12: *Analoges Temperatur-Ausgabesignal-VOT des DIPIPM+.*

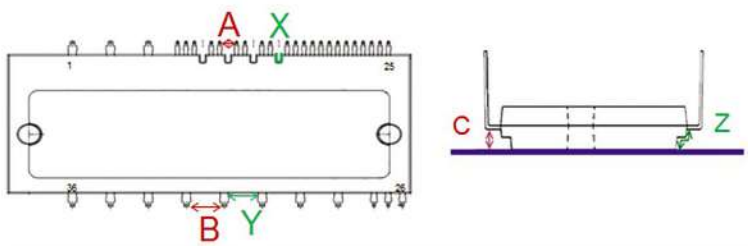
TYPE NAME	RATED CURRENT	RATED VOLTAGE	MOTOR RATINGS
PSS05xC1FT	5 A	1200 V	0.75 kW/400 VAC
PSS10xC1FT	10 A		1.5 kW/400 VAC
PSS15xC1FT	15 A		2.2 kW/400 VAC
PSS25xC1FT	25 A		3.7 kW/400 VAC
PSS35xC1FT	35 A		5.5 kW/400 VAC

Tabelle 1: *hgkdsjfh gkdfhg kdfh gkdfh gkdfh gkdfh gkdf g*

Tc=100 °C; Tjavg=125 °C; cos phi=0,8; sinusförmige PWM; M=1; Rth(j-c)=max ist. Basierend auf diesem recht konservativen Auslegungsansatz wurden die Motorleistungen in Tabelle 1 abgeleitet [4], wobei hier eine Überlastfähigkeit von 150% für 1 Minute angenommen wurde.

Viele Umrichter-Hersteller sind dazu übergegangen, die maximale Umrichter-Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der zulässigen Überlastfähigkeit zu spezifizieren. Diese als duale (oder multiple) bezeichnete Spezifikationsmethode erlaubt, die Umrichterbaugröße besser an die Applikationsbedingungen anzupassen. Falls z.B. in einer Applikation eine geringe Überlastfähigkeit (LO=Low Overload) benötigt wird, kann der größte anschließbare Motor eine Baugröße höher zu spezifizieren. Ist dagegen eine kurzzeitige höhere Überlastfähigkeit (HO=High Overload) gefordert, wird der maximal anschließbare Motor eine Leistungsstufe kleiner spezifiziert. Durch diesen Ansatz wird die Wärme-Impedanz (Wärmekapazität) des Kühlkörpers ausgenutzt, um die während einer kurzzeitigen Überlastsituation abgegebenen Halbleiter-Mehrverluste vom Kühlsystem zu absorbieren. So ist durch die Nutzung der eingebauten thermischen Systemreserve einer gegebenen Umrichter-Hardware für eine kurze Zeit eine höhere Umrichter-Ausgansleistung erzielbar. Hierzu ist eine genaue Information über die tatsächliche Betriebstemperatur im Leistungshalbleitermodul notwendig. Üblicherweise wird dafür ein NTC auf dem Kühlkörper angebracht oder es wird ein integrierter NTC im Leistungshalbleitermodul verwendet. Das DIPIPM+ bietet hierfür ein analoges Temperatur-Ausgabesignal VOT mit einer linearen Übertragungskennlinie über den gesamten Betriebstemperaturbereich (Bild 12). Die Nutzung dieses genauen, analogen VOT-Signals ermöglicht es, in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebstemperatur, kurzzeitig deutlich höhere Umrichter-Ausgangsströme auszunutzen als in Bild 11 aufgezeigt; ohne das Risiko, dass die Ansprechschwelle der Übertemperatur-Schutzabschaltung im Umrichter erreicht wird.

Das analoge VOT-Signal des DIPIPM+ kann außerdem genutzt werden, um die Robustheit des Umrichters gegenüber rauen Einsatzbedingungen zu erhöhen. Üblicherweise wird die Spezifikation des Wechselrichters für eine maximale Umgebungstemperatur von Ta=+40 °C angegeben. Bei höheren Umgebungstemperaturen wird dann ein De-Rating der Umrichter-Ausgangsleistung vorgesehen. Durch die Nutzung des VOT-Signals sind verschiedene andere Optionen für eine



PSSxxMC1FT	Clearance		Creepage	
Between control terminals (High voltage terminal to Low voltage terminal)	A	2.5mm	X	6.4mm
Between power terminals	B	5.8mm	Y	6.0mm
Between terminals and Earth (Terminal to Heatsink)	C	2.5mm	Z	4.3mm

Bild 13: *Kriech- und Luftstrecken des DIPIPM+-Gehäuses.*

adaptive Verlustleistungsabsenkung im Wechselrichter während des Betriebes bei sehr hohen Umgebungstemperaturen aktivierbar: bevor eine kritische Temperatur im Leistungshalbleitermodul erreicht und dadurch eine Übertemperatur-Schutzabschaltung des Antriebs ausgelöst wird, könnte zum Beispiel durch das Senken der PWM-Schaltfrequenz fc oder durch das Reduzieren des Umrichter-Ausgangsstromes für eine thermische Entlastung gesorgt werden.

Gut geeignet für industrielle 400-V-Umrichter

Die DIPIPM-Technologie wurde ursprünglich entwickelt, um eine kosteneffektive und zuverlässige Umrichter-Antriebslösung für in sehr hohen Stückzahlen produzierte Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen, Klimaanlagen, Kühlschränke zu schaffen [5]. In den letzten 20 Jahren hat Mitsubishi Electric mehr als 450 Millionen DIPIPM-Module in verschiedenen Gehäusen, Spannungen und Nennströmen hergestellt. Für industrielle 400-V-Umrichter konnten bisher 1200-V-DIPIPMs eingesetzt werden, für die jedoch

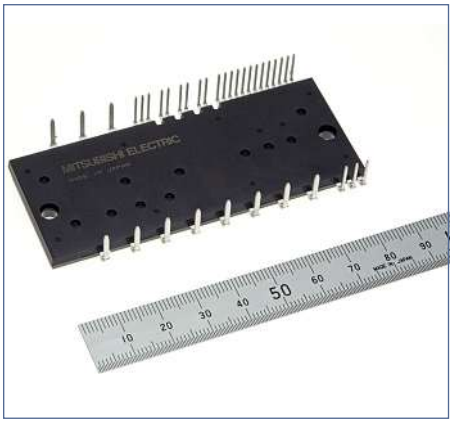


Bild 14: *Die hohe Integrationsdichte des DIPIPM+ im Dual-Inline-Gehäuse reduziert die Anzahl der benötigten Einzelkomponenten drastisch.*

ein separater Eingangsgleichrichter und ggf. ein Bremssteller erforderlich waren. Die neue 1200-V-DIPIPM+-Baureihe wurde als All-In-One-Lösung für die speziellen Bedürfnisse kompakter industrieller 400-V-Umrichter entwickelt. Die Isolationsspannung beträgt Viso = 2500 VAC und alle relevanten Kriech- und Luftstreckenanforderungen werden erfüllt (Bild 13). Das Gehäuse des DIPIPM+ ist frei von Siloxan und deshalb gut geeignet für Anwendungen, in denen die Verwendung von IGBT-Modulen mit Silikongel nicht erlaubt ist. Die DIPIPM+-Serie ist UL-zertifiziert (UL1557 File E323585) und ROHS-konform. // KU

Mitsubishi Electric

Literatur und Quellenhinweise

[1] *Mitsubishi Electric Corp.: "Mitsubishi Electric to launch DIPIPM+ Series" Pressemitteilung Nr. 2928; 07.05.2015*

[2] *M. Honsberg et al.: "A novel Transfer Molding Intelligent Convert Inverter Brake IGBT module (DIPIPM+) with integrated level shifting control ICs", PCIM Europe 2016, Conference proceedings, .889-894*

[3] *Mitsubishi Electric Corp.: DIPIPM+ Testplatine User Manual (Datum der Veröffentlichung: Juli 2015)*

[4] *Mitsubishi Electric Corp.: „DIPIPM+ Series" Application Note DPH-12856 (Datum der Veröffentlichung: Juli 2016)*

[5] *S. Noda et al.: "A novel Super Compact Intelligent Power Module", PCIM Europe 1997, Conference proceedings S.1-9*

SEMIKRON
innovation + service

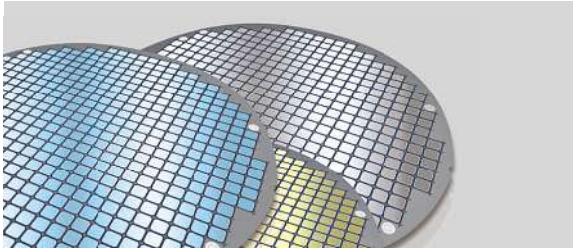
Höchste Liefersicherheit durch eine breite Palette an Industrie-Standardmodulen

Mehrere Lieferquellen für IGBT und Diodenchips in allen Spannungsklassen

Besser als der Standard durch:
- intelligente Integration von Funktionalität ohne Änderung der Baugröße
- Optimierung der thermischen und dynamischen Performance

Motor Drives · Wind Energy · Solar Energy · Power Quality · Utility Vehicles · Urban Transport Equipment

www.semikron.com shop.semikron.com

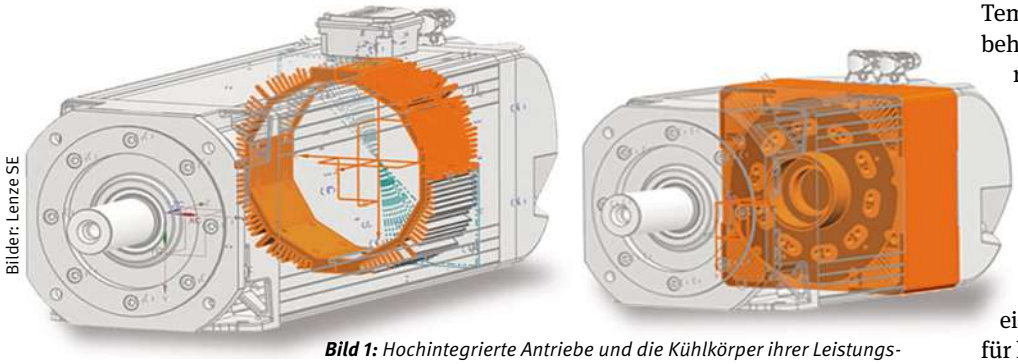


Multiple Sourcing
Liefersicherheit ist unser Antrieb

Integrierte Kühlkörper für Leistungshalbleiter optimieren

Die Optimierung von Standard-Kühlkörpern mit ebener Bodenplatte ist gängige Technik. In diesem Artikel werden drei Wege verglichen, wie sich beliebig geformte Kühlkörper-Geometrien optimieren lassen.

JAN WETTLAUFER *



Bilder: Lenze SE

Bild 1: *Hochintegrierte Antriebe und die Kühlkörper ihrer Leistungselektronik (orange eingefärbt).*

Wechselrichter und hochintegrierte Antriebe können durch funktionale Integration deutlich kompakter gestaltet werden. Hierfür ist es vorteilhaft, die Kühlkörper der Leistungshalbleiter in die Struktur der Gesamtkonstruktion zu integrieren. Eine effektive Kühlung ist hauptsächlich abhängig von einer verteilten Anordnung der Wärmequellen, einer guten Führung der Kühlluft und einer geeigneten Kühlkörpergeometrie.

Durch eine Kombination von Rapid-Prototyping-Technologien, Messungen und Simulationen ist eine schnelle, zielgerichtete und wirtschaftliche Optimierung möglich. Diese führt sowohl zu einer höheren Leistungsdichte als auch durch niedrigere Temperaturen zu einer erhöhten Zuverlässigkeit und Lebensdauer der optimierten Geräte.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „EMiLE“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16EMO0007 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

*** Dipl.-Ing. Jan Wettlaufer**
... forscht u.a. an der Motorintegration von Leistungselektronik in der Abteilung Innovation bei Lenze SE in Extertal.

Bei kompakten leistungselektronischen Geräten ist die mögliche Dauerleistung meist thermisch bedingt; der limitierende Faktor ist die Kühlung der Leistungshalbleiter. In [3] und [4] ist ein neuartiges Integrationskonzept für besonders kompakte Antriebe mit Luftkühlung beschrieben. Wie in Bild 1 zu sehen, ist dabei der Kühlkörper der Leistungselektronik (orange eingefärbt) vollständig in das Motorgehäuse integriert. In diesem Artikel wird dargelegt, wie der thermische Widerstand solch integrierter Kühlkörper ingenieurmäßig optimiert werden kann.

Grundsätzliches Vorgehen beim Geräte-Design

Um eine deutliche Überdimensionierung oder die Zerstörung aufgrund zu hoher Temperaturen zu vermeiden, ist beim Entwurf elektrischer oder mechatronischer Geräte die Temperatur an den kritischen Stellen ausreichend genau abzuschätzen. Ein hochintegrierter Antrieb lässt sich aus thermischer Sicht in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Anforderungen einteilen: Den Bereich der elektrischen Maschine und den Bereich der Leistungselektronik.

Mit den nach Stand-der-Technik üblichen Isolierstoffklassen für Lackdrähte und den verfügbaren Magnetmaterialien sind die in hochintegrierten Antrieben zu erwartenden Temperaturen für elektrische Maschinen beherrschbar. Anders sieht es bei der integrierten Elektronik aus. Ihre Kühlung ist eine Herausforderung. Am kritischsten ist dabei die Komponente, welche zuerst ihre zulässige Betriebstemperatur überschreitet oder aufgrund temperaturbedingter Alterungsmechanismen ausfällt.

In Bild 2 rechts ist ein Schnitt durch ein intelligentes Leistungshalbleitermodul für hochintegrierte Antriebe aus dem BMBF Verbundforschungsprojekt EMiLE (Elektro Motor integrierte Leistungs-Elektronik) skizziert; dieses wird als SST-Modul (SST; Smart Stator Tooth) bezeichnet und beinhaltet neben den Leistungshalbleitern beispielsweise auch Sensorik, Gate-Treiber und ein FPGA zur Signalverarbeitung.

Die „weiß“ dargestellten Elemente sind Wärmequellen. FPGAs besitzen Verlustleistungen von etwa 0,5 bis 2 W; ihre maximale Betriebstemperatur ist typenabhängig auf ca. 100 bis 125 °C begrenzt. Die skizzierten Leistungshalbleiter verursachen abhängig vom Betriebspunkt bis zu 100 W Verluste. Sie können mit Sperrschichttemperaturen von 150 °C und mehr betrieben werden.

In der Praxis steht der Ingenieur vor der Herausforderung, aus Konstruktionsdaten ein thermisches Ersatzschaltbild abzuleiten, die Verluste zu berechnen und mit beiden die Temperatur in den potenziell kritischen Bauteilen abzuschätzen.

Thermisches Ersatzschaltbild aus der Konstruktion ableiten

In Bild 3 ist ein Ausschnitt des Ersatzschaltbildes der Leistungselektronik des in Bild 1 links dargestellten Antriebes gezeigt. Das Ersatzschaltbild gliedert sich in drei Teile:

- Leistungshalbleiter und DCB (Direct Copper Bond) sind rot eingerahmt. Die Leistungshalbleiter sind als Wärmequellen dargestellt. Die einzelnen Schichten

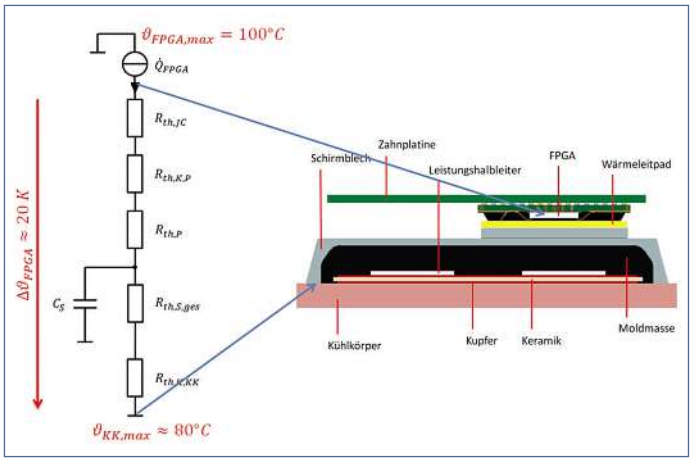


Bild 2: *Schnitt durch die Leistungselektronik; das thermisch kritische Bauteil ist in diesem Fall das FPGA. Die Leistungshalbleiter sind thermisch unkritisch.*

des DCBs als thermische Widerstände und Kapazitäten.

- Blau eingerahmt ist in Bild 3 das in Bild 2 links detailliert dargestellte Ersatzschaltbild des Schirmblechs, welches das FPGA entwärmt.
- Das thermische Ersatzschaltbild des in das Motorgehäuse integrierten Kühlkörpers ist grün umrandet.

Die rot und blau eingerahmten Ersatzschaltbilder wurden mit auf den CAD-Daten aufbauenden thermischen FEM-Simulationen ermittelt. Die Verlustleistungen sind mit Hilfe linearisierter Verlustmodelle berechnet worden.

Dabei wird deutlich, was aus Bild 2 schon zu erkennen ist: Trotz seiner deutlich geringeren Verlustleistung ist das FPGA thermisch kritischer als die Leistungshalbleiter. Es begrenzt die an der Kühlkörperoberfläche zulässige Temperatur auf ca. 80 °C.

Mit diesem Wert, den Verlustleistungen im Nennpunkt und der maximal zulässigen Umgebungstemperatur wurde die „Zielgröße" der thermischen Optimierung, der thermische Kühlkörperwiderstand $R_{th,KK}$ auf 0,3 K/W abgeschätzt. Hiermit kann die eigentliche Arbeit beginnen, die Optimierung der Kühlkörpergeometrie und der Luftführung. Was den thermischen Kühlkörperwiderstand im Wesentlichen bestimmt und welche möglichen Wege zur Optimierung es gibt, wird nachfolgend im Artikelverlauf skizziert.

Möglichkeiten zur thermischen Optimierung

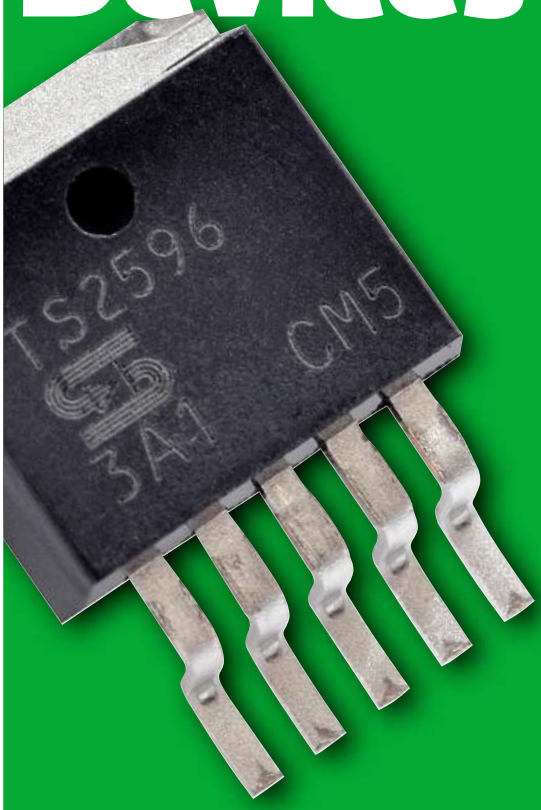
Durch einen Radiallüfter wird die Kühlluft beschleunigt und über die Lüfterhaube auf den integrierten Kühlkörper geleitet. Dahinter wird mit ihr die elektrische Maschine gekühlt, bevor sie am vorderen Lagerschild wieder aus dem Antrieb austritt. Der thermische Kühlkörperwiderstand wird im Wesentlichen bestimmt durch:

- Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit: Eine möglichst gleichmäßige Verteilung über die einzelnen Kühlrippen ist hierbei das Ziel, denn nur von Luft durchströmte Kühlrippen können Wärme abführen.
- Art der Strömung: Mit turbulenten Strömungen können höhere Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden als mit laminaren, sie sind somit anzustreben.
- Oberfläche und Form der Kühlrippen: Durch eine feinere Verrippung entsteht eine größere Oberfläche zur Entwärmung, jedoch entsteht durch diese Maßnahme auch ein höherer Strömungswiderstand. Im Zweifelsfall sollte die Optimierung mit der feinsten Verrippung begonnen werden, die fertigungstechnisch möglich ist.

Praxisforum Elektrische Antriebstechnik 2017

Schwerpunkte des Praxisforums Elektrische Antriebstechnik 2017 im VCC Würzburg sind am **4. April 2017** u.a. Chip-Lösungen und Power Devices für Motion Control. Trends und Best-Practice-Beispiele bestimmen am **5. April 2017** die Themen Energieeffizient und Automotive. Am **6. April 2017** stehen Medizintechnik, Software und Simulation im Mittelpunkt der Vorträge. Eine themenbegleitende **Fachausstellung am 5. und 6. April** zeigt einsetzbare Technik. Das Programm und weitere Details unter www.praxisforum-antriebstechnik.de.

Power Devices



TAIWAN SEMICONDUCTOR

Power Devices
- Alle Standard-Dioden und Brückengleichrichter
- IGBTs und MOSFETs
- Standard-Komparatoren und OPs
- Festspannungsregler
- Low-Drop-Festspannungsregler
- Schaltregler
- LED-Treiber
- Hallsensoren

Distribution by Schukat electronic
- Über 200 Hersteller
- 97% ab Lager lieferbar
- Top-Preise von Muster bis Serie
- persönlicher Kundenservice

Onlineshop mit stündlich aktualisierten Preisen und Lagerbeständen

schukat.com

SCHUKAT electronic

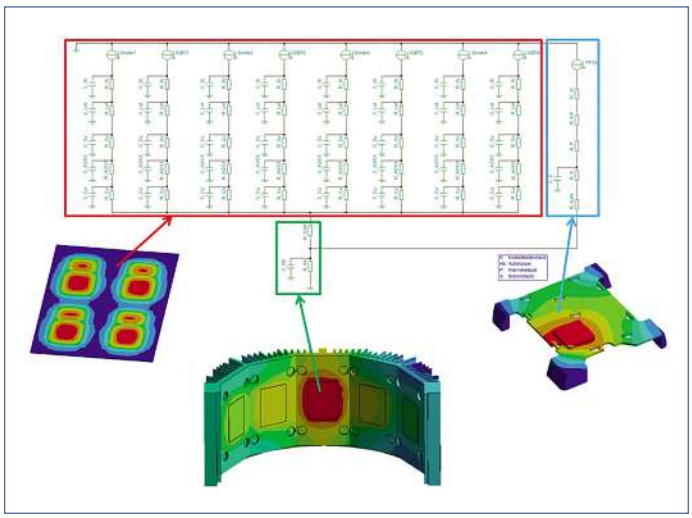


Bild 3: *Ausschnitt aus dem thermischen Ersatzschaltbild eines hochintegrierten Antriebes.*

Bild 4 zeigt drei mögliche Wege (A, B und C) zur Ermittlung des thermischen Kühlkörper-Widerstandes $R_{(th,KK)}$. Doch wie geeignet sind diese Wege und welche Probleme lauern bei ihrer Durchführung?

Weg A – 3D-Strömungssimulation: Im Bereich der Leistungselektronik verbreitete 2½D-CFD- Software (computational fluid dynamics; numerische Strömungsmechanik) mit automatisierter, strukturierter Vernetzung (z.B. ANSYS ICEPak, Cradle HeatDesigner oder Mentor Graphics FloTHERM) ist zur Optimierung von planaren Geometrien (beispielsweise bestückte Leiterkarten) konzipiert. Die komplexe Luftführung der hier untersuchten Antriebe konnte nicht erfolgreich nachgebildet werden. Hierzu wäre eine 3D-Strömungssimulation mit unstrukturierter Vernetzung erforderlich, welche ein manuell vorbereitetes (vernetztes) Modell und eine hohe Rechenleistung erfordern.

Weg B – indirekte Messung: Anstatt die Strömung zu simulieren kann sie auch an einer Attrappe gemessen werden. Dazu wird das Gehäuse des hochintegrierten Antriebes aufgebaut, siehe Bild 5 oben links. Dabei ist nur der Lüfter funktional. Der orange dargestellte Kühlkörper stammt aus dem 3D-Drucker. Hierbei ist eine glatte Oberfläche wichtig, wodurch Pulverdrucker (selektives Laser-Sintern) eher geeignet sind als Extrusionsdrucker. Mit einer Hitzkopfsonde wurde die Strömungsgeschwindigkeit gemessen und hierüber die Wärmeübergangskoeffizienten der Kühlrippen analytisch berechnet. Die hierfür notwendigen Formeln wurden der einschlägigen Fachliteratur entnommen [5], [6] und [7]. Hiermit war die Basis für die nachfolgend durchgeführte thermische FEM Simulation geschaffen.

Weg C – direkte Messung: Konnte für Weg B ein Kühlkörper aus dem 3D-Drucker verwendet werden, so ist bei Weg C ein funktionaler Kühlkörper notwendig. Dieser ist aus Vollmaterial herzustellen. Anstatt der Strömungsgeschwindigkeit werden jetzt stationäre Temperaturen gemessen. Die Leistungshalbleiter wurden durch Heizwiderstände substituiert, da ihre Heizleistung exakt regulierbar ist und zum Zeitpunkt der Versuche noch keine funktionsfähige Leistungselektronik existierte.

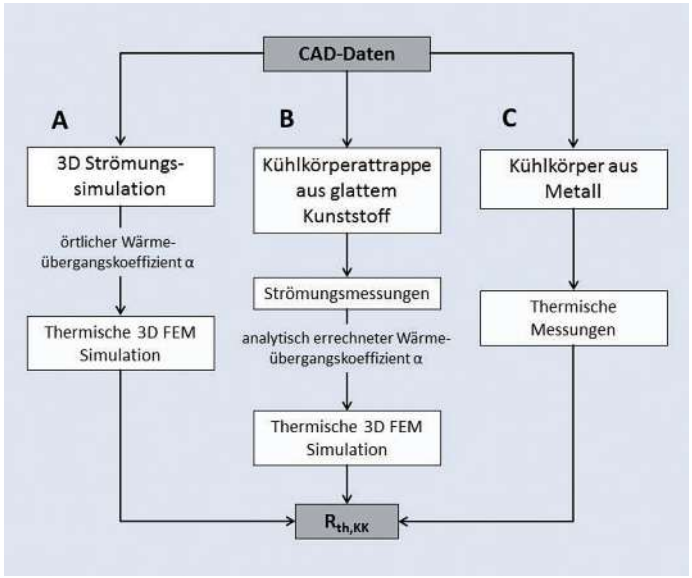


Bild 4: *Drei Wege zur Ermittlung des thermischen Kühlkörperwiderstandes.*

Vergleich Simulation, indirekte und direkte Messung

Die wesentlichen Bewertungskriterien, um die Eignung der drei Wege A, B und C zu beurteilen, sind:

- Initiale Kosten: Sie fallen an, bevor die erste Simulation oder Messung durchgeführt werden kann. In ihnen sind die Kosten für Software-Lizenzen, Prototypen und Mess-Equipment enthalten. Je nach Ausgangslage ist auch die Qualifizierung von Mitarbeitern zu berücksichtigen.
- Initialer Aufwand: Er beschreibt den Umfang der Arbeiten, um Simulationen vorzubereiten oder Versuche aufzubauen.
- Fehlerrisiko: Damit ist gemeint, dass der Ingenieur ein falsches Ergebnis erhält, dieses aber nicht als ein solches einordnet.
- Aufwand pro Versuch: Arbeitsaufwand für einen Versuch, also für einen Simulationsdurchlauf oder die Erfassung eines Messwertes. Dies hat wesentlichen Einfluss darauf, wie lange ein Iterationsschritt der thermischen Optimierung dauert.
- Aufwand Parameterstudie: Besonders durch Simulationen mit parametrierbaren Modellen kann der Aufwand für Parameterstudien gesenkt werden. Wohingegen bei Messungen jeweils Teile des Aufbaus geändert werden müssen und Parameterstudien dadurch aufwendiger sind.
- Erkenntnisgewinn: Je höher der Erkenntnisgewinn aus einer Messung oder einer Simulation ist, desto weniger Iterationsschritte sind nötig, um zu einem guten Ergebnis zu gelangen.

3D-Strömungssimulationen (Weg A) eignen sich zur Untersuchung von Strömungen an komplexen Geometrien. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie Strömungen visualisieren und somit für den Entwickler verständlich werden lassen. Mit parametrierbar aufgebauten Geometrien können Parameterstudien automatisiert durchgeführt werden, was eine Optimierung unter gegebenen Randbedingungen vereinfacht.

Für teure und komplexe Produkte (Rotorblätter von Windkraftanlagen, Turbinen o.ä.) sind die hohen initialen Aufwände und Kosten vertretbar, für eine relativ einfache und

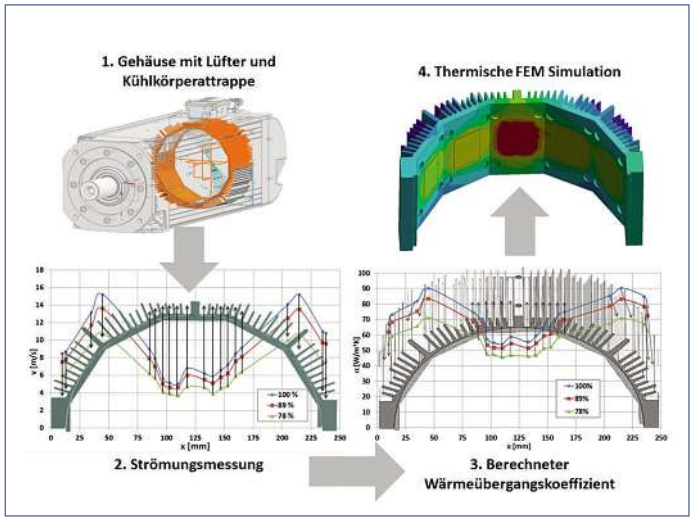


Bild 5: *Vorgehen bei der indirekten Messung des thermischen Kühlkörperwiderstandes.*

preisgünstig herzustellende Komponente wie einen integrierten Kühlkörper jedoch unverhältnismäßig. Um die initialen Aufwände und Kosten zu umgehen, sowie das Fehlerrisiko zu senken, besteht die Möglichkeit, Simulationen durch entsprechend qualifizierte Dienstleister durchführen zu lassen.

Eine direkte Messung (Weg C) erscheint auf den ersten Blick einfach und zuverlässig. Bei den durchgeführten Messungen hat sich aber gezeigt, dass insbesondere die richtige Befestigung der Heizwiderstände und die Temperaturmessung in der Praxis nicht trivial sind. Zudem ist der zeitliche Aufwand für Messreihen hoch, denn für jeden Messpunkt ist der stationäre Zustand abzuwarten. Pro Arbeitstag können so weniger als zehn Messpunkte gemessen werden. Sollen unterschiedliche Kühlkörpergeometrien verglichen werden, so ist jeweils ein neuer funktionaler Kühlkörper herzustellen. Eine solche Einzelstückfertigung des gewünschten Kühlkörpers über Fräs- und Senkerodierprozesse führt zu hohen Kosten.

Für die indirekte Messung (Weg B) wird kein funktionaler Kühlkörper benötigt. Eine Plastikattrappe mit glatter Oberfläche aus dem 3D-Drucker ist ausreichend. Diese ist schnell und kostengünstig direkt aus CAD-Daten herstellbar. Der Aufwand für Parameterstudien ist somit deutlich geringer als bei der direkten Messung. Aus Bild 5 wird deutlich, welche Kühlrippen schlecht durchströmt werden (x = 75 - 175 mm) und welcher Bereich des Kühlkörpers (roter Bereich in der Mitte) besonders heiß wird. Hierdurch ist der Erkenntnisgewinn deutlich größer als bei der direkten Messung.

Thermische Optimierungen haben hohes Potenzial, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit elektrischer und mechatronischer Geräte zu erhöhen. So hat die Optimierung von Kühlkörpergeometrie und Luftführung im gezeigten Beispiel zu einer Reduzierung des thermischen Kühlkörperwiderstandes um 70% geführt. Dies bedeutet in erster Näherung 140% mehr Dauerleistung bei gleichen Abmessungen. Der aufgezeigte Weg B ist ein pragmatischer Ansatz, beliebig geformte Kühlkörper schneller und kostengünstiger zu optimieren als mit den bisher bekannten Wegen A und C. // **KU**

Lenze SE

Literatur und Qellenhinweise

[1] *A. Shah, B. G. Sammakia, H. Srihari and K. Ramakrishna, "A numerical study of the thermal performance of an impingement heat sink-fin shape optimization," in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 27, no. 4, pp. 710-717, Dec. 2004.*

[2] *M. F. Holahan: "Fins, fans, and form: volumetric limits to air-side heatsink performance," in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 255-262, June 2005.*

[3] *J. Wettlaufer; H. Borcherding; F. Klute; T. Jonsky: "A compact servo drive: Five phase, air cooled, with highly integrated inverter for industrial use," in Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference on, vol., no., pp.1-10, 8-10 Sept. 2015*

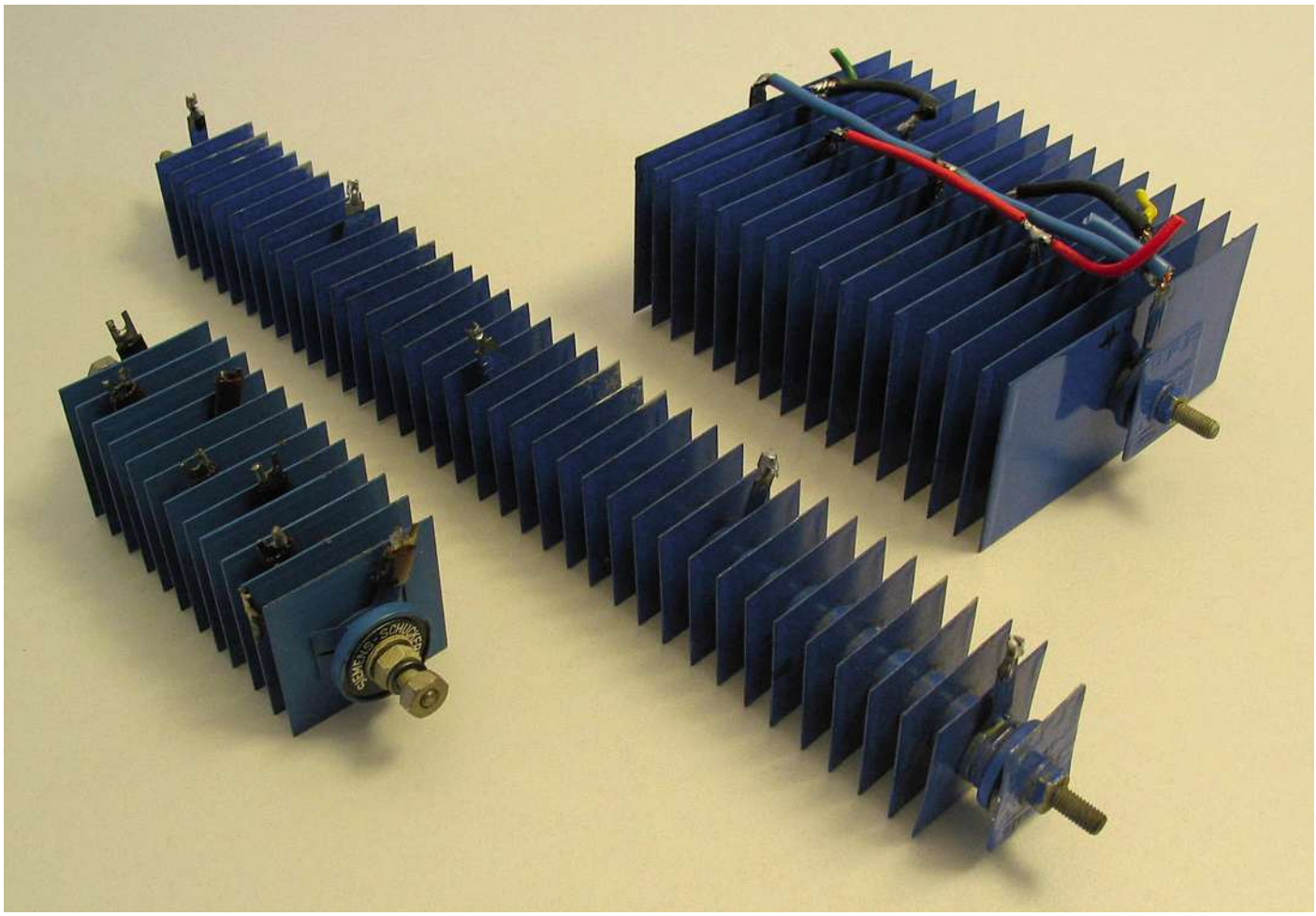
[4] *J. Wettlaufer; T. Jonsky; H. Borcherding; J. Wilde; P. Lübke; R. Hernandez; F. Klute: „A novel servo drive: air-cooled, multi-phase permanent-magnet synchronous machine with highly integrated power electronics". EEMODS 2015; energy efficiency in motor driven systems, Helsinki, 15-17 Sep. 2015*

[5] *P. Böckh; T. Wetzel: „Wärmeübertragung: Grundlage und Praxis". Berlin, Heidelberg: Springer, 2011*

[6] *J.P. Holman: „Heat Transfer". Mc Graw-Hill book co., tenth edition, Chapter 6*

[7] *V. Gnielinski: "VDI Wärmeatlas " Kapitel 4 & 6*

[8] *J. Wettlaufer: Motorintegrierte Leistungs- und Regelungselektronik: ELEKTRONIKPRAXIS Ausgabe 22/2015*



Bilder: Infineon

Bild 1: *Die Plattengröße des Selengleichrichters bestimmte seine Stromtragfähigkeit. Ein wichtiges Einsatzgebiet waren Stromversorgungen.*

Vom Selen zum Siliziumkarbid: Historie der Leistungselektronik

Fundamente der Elektronik: Georg Simon Ohm erkannte 1821 die Proportionalität von Strom, Widerstand und Spannung; Jöns Jakob Berzelius entdeckte 1818 das Selen, 1823 Silizium und 1824 Tantal.

MARTIN SCHULZ *

Definition der Elektrizität: Die Elektrizität ist der reine Zweck der Gestalt, die sich von ihr befreit; die Gestalt, die ihre Gleichgültigkeit aufzuheben anfängt, denn die Elektrizität ist das unmittelbare Hervortreten oder das noch nicht von der Gestalt herkommende, noch durch sie bedingte Dasein, oder noch nicht die Auflösung der Gestalt selbst, sondern der oberflächliche Prozeß, worin die Differenzen ihre Gestalt verlassen, aber sie zu ihrer Bedingung haben und noch nicht an ihnen selbstständig sind. (Georg Wilhelm Friedrich Hegel, 1770-1831)

*** Dr. Martin Schulz**
... arbeitet im Application Engineering bei Infineon Technologies in Warstein.

Hegels Vorstellung davon was Elektrizität sei stammt aus einer Zeit, in der das Thema eher philosophisch als ingenieurwissenschaftlich betrachtet wurde. Der wissenschaftliche Ansatz zum Verständnis der Elektrizität geht aber ebenfalls auf das siebzehnte Jahrhundert zurück. Stephen Gray beschrieb bereits 1727 den Unterschied zwischen Leitern und Nichtleitern. Siebzig Jahre später, 1800, erfindet Alessandro Volta die Batterie; aber knapp 100 Jahre dauerte es, bis Georg Simon Ohm 1821 die Proportionalität von Strom, Widerstand und Spannung beschrieb – das Ohm'sche Gesetz. James

Clerk Maxwell entwickelt 1864 das häufig als Maxwells wunderbare Gleichungen bezeichnete System aus nur vier Gleichungen, mit denen sich alle elektromagnetischen Zusammenhänge mathematisch erfassen lassen. Heute ist Elektrizität der omnipräsente Begleiter in allen Industrienationen obwohl, oder gerade weil, sie nur genau zwei Dinge ermöglicht: Elektrizität erlaubt die Übermittlung von Information oder den Transport von Energie.

Erste Schritte der Elektrifizierung

1890 stritten Westinghouse und Edison um die Versorgung der Vereinigten Staaten von Amerika mit Elektrizität. Kern des Zwists war die Frage, ob sich die von Edison bevorzugte Gleichspannung oder das von Westinghouse favorisierte Drehspannungssystem durchsetzen würden. Das Ergebnis ist bekannt, die Wechselspannung gewann das Rennen. Alle weltweit installierten Industrienetze zur Verteilung von elektrischem Strom an Endverbraucher sind heute Wechselspannungsnetze. Gleichspannungsnetze bleiben dagegen die bevorzugten Lösungen in der Welt der Energieübertragung über lange Distanzen; hier haben sie sich wegen der höheren Effizienz der Gleichstromtechnik durchgesetzt.

In den Anfängen der Elektrifizierung waren lediglich Glühlampen und wenige elektrische Motoren als Verbraucher am Netz; eine lokale Anpassung der Spannung an eine Applikation war daher unnötig. Ende der 1880er entwickelte Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski den Drehstrom-Asynchronmotor, der zwar zum Arbeitspferd der Industrie wird, dessen Drehgeschwindigkeitsregelung aber noch schwierig ist.

Vom Gleichrichter zum Schalter moderner Leistungselektronik

1891 führt Harry Ward Leonard mit dem nach ihm benannten Leonard-Satz eine Kombination aus rotierenden elektrischen Maschinen ein, die auf mechanisch-elektromagnetischem Weg eine Veränderung von Frequenz und Amplitude eines Drehstromsystems gestattet. Es sollte weitere 90 Jahre dauern, bis diese Aufgabe großflächig ohne den Einsatz mechanischer Komponenten möglich wurde, obwohl mit dem 1874 von Ferdinand Braun entdeckten Gleichrichtereffekt bereits eine wichtige Grundlage geschaffen war – ein Schritt in Richtung Halbleiter-Diode.

Greenleaf Whittier Pickard erhält 1906 das erste Patent auf eine Diode auf Siliziumbasis. Der gleichrichtende Effekt von Halbleiter-Metallkontakten wurde bereits in den 1920ern in Kupfersulfid/Kupfer-Gleichrichtern genutzt. In den späten 1920ern entwickelte Ernst Presser in Deutschland den Selengleichrichter, aber erst 1939 war es Walter Shottky, der die Theorie und die physikalischen Zusammenhänge hinter diesem Prinzip verstanden und beschrieben hat.

Die Entwicklung der modernen Leistungselektronik macht von hier an Sprünge etwa im 10-Jahres-Rhythmus: 1947 entwickeln Bardeen, Shockley und Brattain den ersten Transistor, eine Arbeit für die sie kurz darauf den Nobelpreis erhielten. Bereits 1950 taucht in den USA der Begriff „Power Electronics“ auf. 1957 folgt von Shockley, Ebers und Moll der erste Thyristor.

Dieses Bauelement erlaubt die Kontrolle größerer Ströme unter Verwendung von Halbleitern und hat bis heute in der Bauform von Scheibenzellen für Hochleistungsapplikationen einen festen Platz am Markt. Auch in kleineren Leistungen findet es sich bis heute in Dimmern und Motorstartgeräten. Der Nachteil, dass das Bauelement nur mit erheblichem Aufwand auszuschalten ist führt zur Entwicklung von speziellen abschaltbaren Varianten wie dem Integrated-Gate-Commutated Thyristor (GTO) oder dem MOS-Controlled Thyristor (MCT).

Beide sind heute vom Markt so gut wie verschwunden; dennoch ist der Thyristor bei weitem keine Technik von gestern. Eine einzigartige Entwicklung bezüglich des Thyristors stellen die mit einem Lichtimpuls einschaltbaren Thyristoren dar. Der Light-Triggered-Thyristor (LTT) als prominenter Vertreter seiner Gattung in der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) eliminiert durch den Einsatz von Licht als Steuergröße die Unsicherheit der auf unterschiedlichen Leitungslängen basierenden Laufzeiten; er wurde 1997 vorgestellt.

Der Japaner Yamagami beschreibt 1968 einen 4-Schicht-Halbleiter der von einer MOSFET-Struktur kontrolliert wird und liefert damit die Vorlage für den ersten, 1982 von Jayant Baliga vorgeführten Insulated Gate Bipolar Transistor – den IGBT. Dieser Schalter wird zum Rückgrat der modernen Leistungselektronik obwohl die ersten Vertreter seiner Art noch unter parasitären Effekten leiden, die ihm aber schnell aberzogen werden können.

Eine deutsche Technologie- und Knowhow-Schmiede

Aus den beiden Unternehmenszweigen Siemens-Halbleiter und AEG-Halbleiter wird Anfang der 1990er die European Power Electronic Company oder eupec GmbH ausgegliedert mit dem Ziel, Hochleistungshalbleiter

DIE TREIBENDE KRAFT

Labor-Netzgeräte von TOELLNER

Einzel- und Doppelnetzgeräte der Serie TOE 8950

Ausgangsspannung bis 260 V
Ausgangsstrom bis 40 A

Sämtliche Geräte verfügen über Eigenschaften, die sie aus der Masse hervorheben:

- Autorange-Kennlinie
- Ausgänge front- und rückseitig
- Einstellungen durch Dreh-Impulsgeber
- Arbeitsbereich-Funktion mit Software zur Erzeugung von beliebigen Spannungskurven
- USB, LAN, GPIB, RS232, Analog-Eingänge

Weltweite Referenzen

TOELLNER®
MADE IN GERMANY

WWW.TOELLNER.DE
Telefon: 0 23 30 – 97 91 91

Bild 2: *GTO der Serie BGT (1987) für Strom von 900 A bis 2 kA und Sperrspannungen von 1,8 bis 2,5 kV.*

am Markt zu etablieren. Bereits 1993 erscheint mit dem Industrial High Power Module (IHM) das erste industrietaugliche IGBT-Modul, das mit einer Sperrspannung von 1200 V und einer Stromtragfähigkeit von 1000 A neue Maßstäbe setzt und zum defacto-Standard avanciert. Die hier gestartete Entwicklung bringt in kürzester Zeit immer weiter optimierte Generationen von IGBTs hervor, die bis heute der Schlüssel zur effizienten Umwandlung von elektrischer Energie sind.

Wegen seiner speziellen Eigenschaften erobert der IGBT eine breite Vielfalt von Applikationen und findet sich heute in allen Leistungsbereich von unter 1 kW bis hin zum Höchstleistungsbereich der Gigawattanwendungen wieder. Die im gleichen Zuge stetig steigenden Anforderungen vom Markt drängen die Entwickler gleichzeitig dazu, neben dem eigentlichen Halbleiterschalter auch die umgebende Aufbau- und Verbindungstechnik zu verbessern. Das Aufgabengebiet Hochleistungshalbleiter wird damit zur interdisziplinären Gesamtaufgabe an der neben den Elektrotechnikern auch Halbleiterphysiker, Metallurgen, Mechaniker, Chemiker, Kunststoff- und Prozesstechniker intensiv mitwirken.

Einst und Jetzt – war früher alles besser?

Welchen globalen Einfluss die Leistungselektronik auf Technik und Gesellschaft hat, entzieht sich sprichwörtlich der Vorstellungskraft. Am besten lässt er sich anhand der nachfolgenden Beispielen darstellen, die sich im Leben Aller wiederfinden. Eine Leuchtstoffröhre mit einer Nennleistung von 36 W und konventionellem Vorschaltgerät ohne Leistungselektronik entnimmt beim Betrieb dem Netz etwa 50 W. Die gleiche Röhre, betrieben mit elektronischem Vorschaltgerät, konsumiert weniger als 40 W. Bei gleicher Ausbeute bedeutet dies eine Steigerung des Wirkungsgrades von über 25%. Ein Auto mit Verbrennungsmotor erreicht im alltäglichen Einsatz einen Wirkungsgrad weit unter 20%, ein vergleichbares Elektrofahrzeug liegt dagegen bei über 80%. Die Ausstattung moderner Züge mit rückspeisefähiger Technik spart bei den Betreibern monatlich erhebliche Geldbeträge aber auch der „kleine Mann“ profitiert von Verbesserungen durch den Einsatz von Leistungshalbleitern. Ein Schweißgerät auf Basis gewickelter Transformatoren bringt, je nach Leistungsklasse, leicht ein Gewicht von 50 kg auf die Waage. Ein leistungsgleiches Gerät, ausgestattet mit Leistungselektronik, geht heute als leichtes mobiles Equipment durch.

Deutschlands ehrgeiziges Projekt Energiewende ist überhaupt erst mit den Mitteln der Leistungselektronik möglich. Windkraft- und Solaranlagen liefern, anders als thermisch betriebene Kraftwerke, keine konstante Spannung. Die von Windkraftanlagen gelieferte Wechselspannung muss in Frequenz

One-stop Solutions of Industrial Power Supplies
➤ Professional Technology & International Standard
➤ 360° Professional Support
➤ Reliability Ensured throughout the whole manufacturing process
DC/DC Converter
0.25-3W Fixed Input
100-1500VDC PV
6-150W Railway Power
3-50W R3 DC/DC Converter
1-240W AC/DC Converter
1-5W LS Series
1-20W LD Series
1-60W LH Series
120W/240W LI Series
Isolation Transmitter
CAN
RS485
RS232
Signal Isolator
Isolation Barrier
*For the detailed information, please refer to datasheet.
MORNSUN®
E-mail: info@mornsun.cn
Website: www.mornsun-power.com
EMTRON
A FORTEC GROUP MEMBER
AUTHORIZED DISTRIBUTOR
Emtron electronic GmbH
Email: info@emtron.de
Website: www.emtron.de

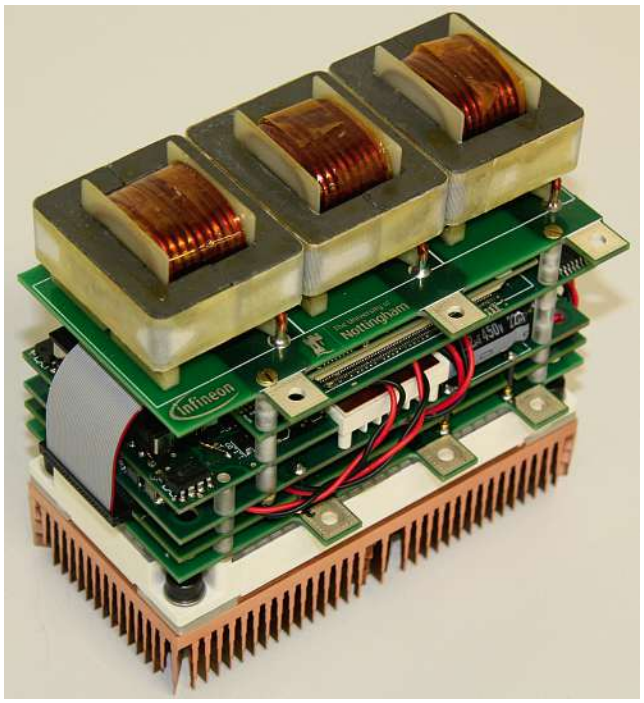


Bild 4: *Ein etwa faustgroßer Matrixumrichter (2011) auf Basis des SiC-J-Fets mit über 20 kW/Liter.*

und Amplitude an das Netz angepasst werden. Die erste großindustriell ausgelegte Windkraftanlage, die in den 1980ern erbaute Growian des RWE, nutzte hierzu einen Leonard-Satz. Die auf 3 MW ausgelegte Anlage erzeugte Verluste in der Größenordnung von 500 kW. Moderne Dreiflügler sind heute mit Leistungen jenseits der 6 MW im Einsatz, der Wirkungsgrad der Energiewandlung ist von den ungefähr 80% des Growians auf Werte um 97% gestiegen. Eine Anlage der 3-MW-Klasse erzeugt weniger als 100 kW Verlustleistung und erbringt bei 2000 Volllaststunden im Jahr im Vergleich zum Growian eine zusätzliche energetische Ausbeute von 800.000 kWh.

Alleine die Steigerung des Wirkungsgrades durch die Leistungselektronik liefert ein Plus an Energie das ausreichend ist, um 200 zusätzliche Haushalte zu versorgen. Die von Solarzellen bereitgestellte Gleichspannung bedarf ebenfalls einer Anpassung an die Bedingungen des zu speisenden Netzes. Auch hier könnte der Leonard-Satz zum Einsatz kommen, aber auch hier liefert die Energiewandlung mittels leistungselektronischer Komponenten das ungleich bessere Ergebnis.

Ist nun das Ende der Entwicklung erreicht?

In den letzten 30 Jahren avancierte der IGBT zur Kernkomponente der Leistungselektronik und ist in dieser Zeitspanne stetig effizienter, leistungsstärker und zuverlässiger geworden. Der stetige Versuch, Geräte immer effizienter, kleiner und in Summe kostengünstiger zu gestalten ist die treibende Kraft hinter der Entwicklung von Schaltern mit immer besseren Eigenschaften, geringeren spezifischen Verlusten und höheren Stromtragfähigkeiten.

Ein noch relativ junger Trend in der Leistungselektronik bringt weiteres Potenzial in die Halbleitertechnologie ein. Die sogenannten Wide-Bandgap Materialien Gallium-Nitrit (GaN) und Siliziumkarbid (SiC) öffnen den Pfad hin zu noch effizienteren Bauelementen, höheren Stromtragfähigkeiten und höheren Schaltfrequenzen. Für leistungselektronische Aufbauten existiert heute eine übliche Obergrenze der volumetrischen Leistungsdichte von etwa 2 kW/Liter. 2011 demonstrierte Infineon den auf SiC-Komponenten aufgebauten Matrixumrichter mit einer Leistungsdichte von 20 kW/Liter.

Wenngleich zwischen Prototyp und möglichem Serien-Design einer leistungselektronischen Entwicklung noch Abstriche an der Leistungsdichte zu erwarten sind, ist dennoch deutlich erkennbar, wohin der Weg führt – ein Ende lässt diese Entwicklung aber nicht erkennen. Gerade erste im Mai 2016 sind auf der Branchenmesse PCIM Europe die jüngsten Innovationen in Sachen SiC bei Infineon vorgestellt worden. Der SiC-MOSFET auf Basis der etablierten Trench-Technologie ist der jüngste Meilenstein in der Geschichte der Leistungselektronik – ganz sicher ist er aber nicht der letzte. // **KU**

Infineon

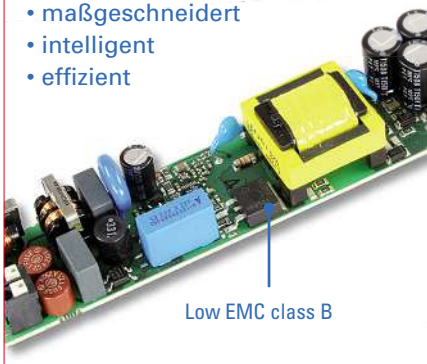
Professional Power

inpotron™
Schaltnetzteile
Switch Mode Power Supplies

Medizinische
Untersuchungsleuchte

Schaltnetzteile für LED-Beleuchtung

- maßgeschneidert
- intelligent
- effizient



Customized Solutions
Made in Germany

Ihr Spezialist für die Entwicklung und Herstellung kundenspezifischer Schaltnetzteile und Stromversorgungslösungen.

inpotron Schaltnetzteile GmbH
Hebelsteinstr. 5, DE-78247 Hilzingen
Phone +49 7731 9757-0
E-Mail info@inpotron.com

www.inpotron.com

Eine industriegerechte AC-USV für die Tragschienenmontage

Wer unter Industriebedingungen AC-Verbraucher per USV absichern will, muss nicht auf Geräte der IT-Welt zugreifen. Die Trio-AC-USV ist ein Hutschienengerät speziell für den Serienmaschinenbau.

CHRISTOPH MANEGOLD *

Bilder: Phoenix Contact

Bild 1: *Das USV-System gibt es für den europäischen und asiatischen Bereich mit 230 VAC sowie mit 120 VAC für den US-Markt.*

Auch wenn in der Automation unbestritten 24 VDC das Maß aller Dinge ist, gibt es nach wie vor Verbraucher im industriellen Einsatz, die auf 230 VAC oder, zum Beispiel in den USA, auf 120 VAC angewiesen sind. Hierbei sind insbesondere Industrie-PCs zu nennen, aber auch bestimmte SPS-Typen oder Aktoren müssen mit AC-Spannung versorgt werden. Gerade im Maschinenbau sind bei kleineren Stückzahlen oder auch bei Anlagen mit Industrie-PCs oder Kameras Spannungsversorgungen im Schaltschrank mit 230 V und 120 V sehr verbreitet.

Wenn höhere Ausfallsicherheit durch Zuschalten einer USV-Lösung gefragt ist, müssen Elektrokonstrukteure improvisieren, damit der Industrie-PC bei kürzeren Spannungsausfällen oder Spannungsschwankungen betriebsbereit bleibt. Zudem muss bei längerem Blackout das kontrollierte Herunterfahren des PC und aller angeschlossenen Prozesse möglich sein.

Daher sind unterbrechungsfreie Stromversorgungen in 19-Zoll-Einschubracks oder Stand-alone-Gehäusen, die eigentlich für den Einsatz in Rechenzentren konzipiert wurden, kein ungewohnter Anblick in Produktionsumgebungen. Doch diese Geräte sind für die kontrollierten Bedingungen in einem Rechenzentrum konzipiert und erfüllen nicht die Anforderungen an elektromagnetische Verträglichkeit, Klimabeständigkeit, Vibration und vieles mehr. Zulassungen für Einsätze unter besonderen Bedingungen wie der Prozesstechnik oder dem Schiffbau sind nicht erreichbar. Aufgrund ihrer Größe können die Geräte nicht in den Schaltschränken installiert werden, sodass die Konstrukteure sie entweder an eine Gehäusewand des Schaltschranks anschrauben oder unter einem Tisch verschwinden lassen.

Die AC-USV für den Schaltschrank

Phoenix Contact bietet bereits mit der industrietauglichen Quint-AC-USV mit IQ Technology eine Alternative zu den häufig anzutreffenden Office-USV-Lösungen. Die USV lässt sich auf die DIN-Schiene rasten, besitzt die industrieüblichen Zulassungen und ist dank unterschiedlicher Energiespeichertechnologien flexibel einsetzbar. Das Gerät für den oberen Leistungsbereich hat sich in vielen Branchen wie der Photovoltaik, Windenergie oder auch der Prozessindustrie bewährt.

Für den Einsatz im Serienmaschinenbau im mittleren Leistungsbereich bietet Phoenix Contact jetzt mit der Trio-AC-USV eine weiteres industrietaugliches Gerät an. Das Unternehmen ist damit einer von wenigen Herstellern, die diese Technologie aktiv mit einem differenzierten Produktportfolio weiterentwickeln. Das System wird in zwei Varianten angeboten. Für den europäischen und asia-

*** Christoph Manegold**
... arbeitet im Unternehmensbereich Corporate Communications bei Phoenix Contact, Blomberg.

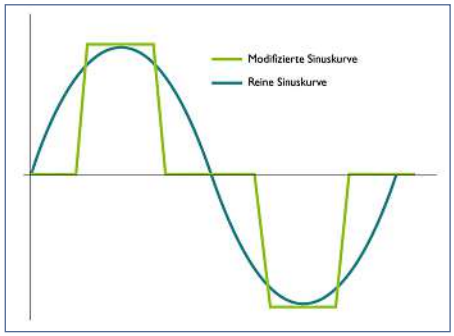


Bild 2: *Nach weniger als 10 ms wird phasensynchron umgeschaltet.*

tischen Bereich gibt es sie mit 230 VAC sowie mit 120 VAC für den US-Markt (Bild 1).

Ausstattung der Geräte und Klassifikation

Die neue unterbrechungsfreie Stromversorgung fügt sich hinsichtlich Design und Funktion an die zweite Generation der Trio-Stromversorgungen an. Das Gerät kann auf eine Hutschiene aufgeschnappt oder mit einem optional erhältlichen Adapter an die Schaltschrankrückwand geschraubt werden. Mit einer geringen Einbautiefe findet die Trio-AC-USV im Gegensatz zu 19-Zoll-Rackgeräten in gebräuchlichen Schaltschränken Platz. Die äußere Erscheinung wird durch die Push-in-Anschlusstechnik und die Kunststofffront geprägt.

So funktioniert die Elektronik: Während des regulären Netzbetriebs werden die Batterien der USV überwacht und geladen, um für den Netzausfall vorbereitet zu sein. Fällt die Netzversorgung aus, schaltet die Trio-USV vom Netzbetrieb auf Batterieversorgung um. Dann wird die Last, etwa ein Industrie-PC, aus der Batterie über einen Wechselrichter versorgt, der die gespeicherte DC-Spannung wieder in eine AC-Spannung wandelt. Dabei ist es für die sensible Elektronik der versorgten Systeme wichtig, dass das USV-Modul nahezu unterbrechungsfrei und phasenrichtig in einer echten Sinuskurve umschaltet. Hier bieten vergleichbare Geräte oft nur eine Trapez- oder Rechteckspannung, die die versorgten AC-Verbraucher aus dem Tritt bringen können.

Gemäß der Klassifikation für unterbrechungsfreien Stromversorgungen VFD SS311 schaltet die Trio-AC-USV vom Netzbetrieb mit 230 V/50 Hz innerhalb von 6 ms auf Batterieversorgung um. Die eingebaute Batterie mit 3,4-Ah liefert für 1,5 Minuten maximal 600 W. Ein weiterer Energiespeicher mit 3,4 Ah von Phoenix Contact lässt sich verbinden, was die Entnahmezeit für den Maximalstrom auf vier Minuten erhöht. Die Energiespeicher sind in wartungsfreier VRLA-Technik (Valve-regulated lead acid – ventilgesteuerte Bleisäurebatterie) ausgeführt. Sie können in einem Temperaturbereich von 0 bis 40 °C betrieben werden.

Signalkontakte und USB-Schnittstelle

Das Gerät besitzt umfangreiche Signalkontakte, die im Schaltschrank mitverdrahtet werden und von einer speicherprogrammierbaren Steuerung ausgelesen werden können. Das sind Alarm: Batteriefehler, BAT-Mode: Batteriebetrieb, Remote: Batteriebetrieb beenden, BAT-Start: Start der USV ohne Netzspannung sowie SGND: Signal Ground. Eine Besonderheit der USV ist die Funktion BAT-Start. Damit lassen sich die Geräte autark ohne Eingangsversorgung betreiben. Hierfür wird lediglich zwischen den Anschlüssen BAT-Start und Ground eine Drahtbrücke gesetzt. Dann kann beispielsweise während der Inbetriebnahme die Ausgangsspannung für kurze Funktionstests der angeschlossenen Komponenten genutzt werden, auch wenn noch kein Netzanschluss vorliegt.

Mit dem Remote-Kontakt ist es möglich, den laufenden Batteriebetrieb zu beenden. Dies ist von Vorteil, wenn der Bediener die Maschine regulär ausschalten möchte. In diesem Fall würde die USV bei Einbrechen der Versorgungsspannung üblicherweise in den Batteriebetrieb gehen und die Lasten weiterversorgen. Dies ist aber in dem Fall nicht gewünscht und führt zu einer unnötigen Belastung der USV. Die Lösung ist einfach: Der Hauptschalter wird mit dem Remote-Signal verdrahtet. Wird die Maschine dann ausgeschaltet, schaltet die USV nicht in den Batteriebetrieb. Erhält die USV das Signal im laufenden Batteriebetrieb, wird dieser sofort beendet.

Neben den Signalkontakten besitzt das Gerät eine USB-Mini-Schnittstelle. Diese dient zum einen für die Parametrierung der USV, um beispielsweise festzulegen, wie lange die USV bei einem Netzausfall die Last versorgen soll, um die Lebensdauer der Batterien zu erhöhen. Außerdem wird per USB-Verbindung der Befehl zum Herunterfahren des PC (Shutdown) bei Netzausfall nach einer einstellbaren Zeit übermittelt.

Für eine dauerhafte Verbindung mit einem Industrie-PC wird von Phoenix Contact ein USB-Kabel mit Rändelverschraubung angeboten, um das Gerät auch in einer zündfähigen Umgebung betreiben zu können. Zur einmaligen Parametrierung kann aber auch ein Standard-USB-Mini-Kabel verwendet werden, wie es Smartphones beiliegt. Wenn die Trio-AC-USV die Spannungsversorgung

On Board

MEAN WELL

MeanWell Power Supplies Serie IRM
- Kompakte Bauform, SMD und THT
- 1 bis 60 W Leistung
- 1 bis 3 W-Typen erfüllen Hausgerätenorm EN 60335-1
- Niedrige Leerlaufleistung
- Für Automatisierung, IoT, Stromversorgung von Sensoren

Distribution by Schukat electronic
- Über 200 Hersteller
- 97 % ab Lager lieferbar
- Top-Preise von Muster bis Serie
- Persönlicher Kundenservice

Onlineshop mit stündlich aktualisierten Preisen und Lagerbeständen

schukat.com

SCHUKAT electronic

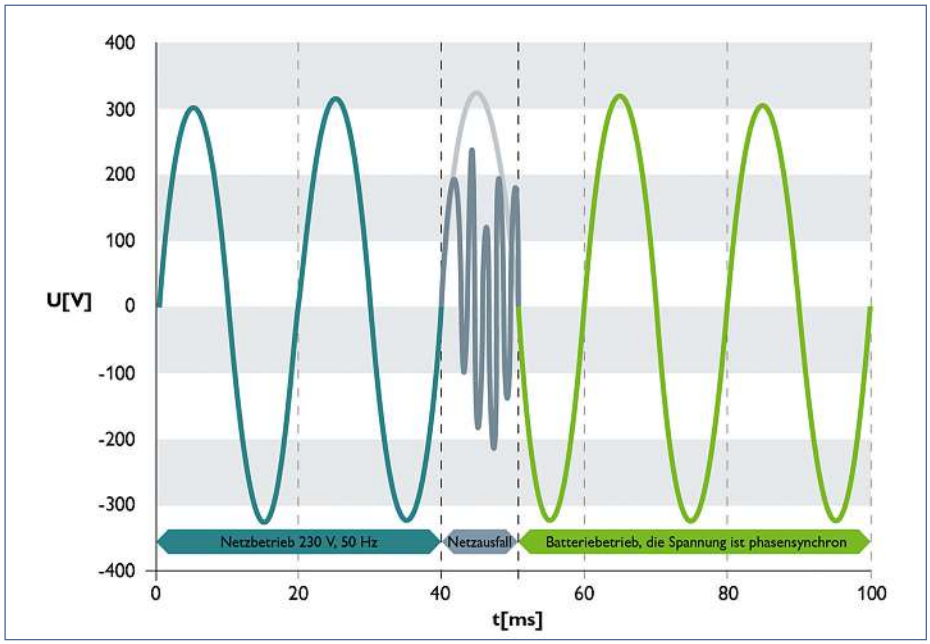


Bild 3: *Die Trio-AC-USV liefert bei Batteriebetrieb eine echte Sinusspannung.*

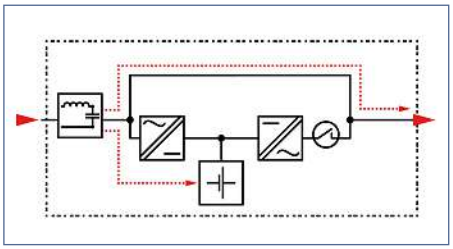


Bild 4: *Voltage-Frequency Dependent, kurz VFD (Offline-Konzept).*

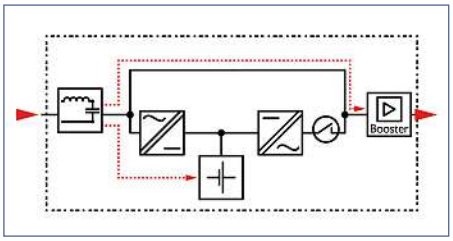


Bild 5: *Voltage-Independent, kurz VI.*

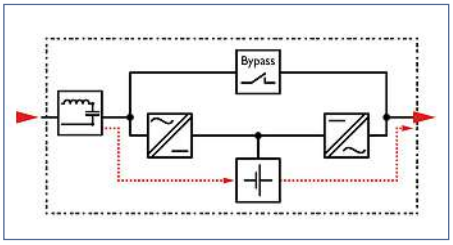


Bild 6: *Voltage-Frequency-Independent, kurz VFI (Online)*

bei Netzausfall übernimmt, kann sie nach einer festgelegten Zeit bei dem angeschlossenen Industrie-PC das kontrollierte Herunterfahren veranlassen. Dafür muss auf dem betreffenden Computer die Software UPS Conf von Phoenix Contact installiert sein. Diese ist kostenfrei herunterladbar und ist kompatibel mit allen gängigen Windows-Betriebssystemen in der Industrie.

Es lässt sich die USV für unterschiedliche Shutdown-Szenarien konfigurieren. Braucht der angeschlossene Industrie-PC zum Beispiel zwei Minuten, um herunterzufahren, dann sendet die USV einen Befehl an die im Hintergrund aktive Software UPS Conf, die dann ihrerseits dem PC das Signal zum Herunterfahren gibt. Danach liefert die Trio-AC-USV noch für zwei Minuten die Wechselspannung, damit der Rechner seine Daten sichern, Applikationen schließen und Kommunikationsverbindungen kontrolliert beenden kann. Ist der Industrie-PC dann sicher heruntergefahren, schaltet sich die USV automatisch aus.

Wird eine Maschine in einer Umgebung mit instabilem Netz betrieben, kann die USV auch so konfiguriert werden, dass sie bei Netzausfall für beispielsweise eine Minute die AC-Versorgung übernimmt, ohne dass sofort der PC heruntergefahren werden muss. Kehrt nach der eingestellten Zeit die Netzspannung nicht zurück, wird der Computer wie im ersten Fall kontrolliert heruntergefahren.

Generell werden USV-Geräte in drei verschiedene Technologien unterteilt. Diese werden nach IEC 62040-3 folgendermaßen bezeichnet: Voltage-Frequency Dependent (VFD), Voltage-Independent (VI), Voltage-Frequency-Independent (VFI).

Die USV-Technologien im Überblick

VFD (Offline-Konzept): Das für industrielle Anwendungen am häufigsten benutzte Konzept für unterbrechungsfreie Stromversorgungen ist der Standby- oder Bereitschaftsbetrieb. Dabei werden die angeschlossenen Verbraucher im Normalbetrieb direkt mit der Wechselspannung aus dem Netz mit Strom versorgt. Zusätzlich wird vom Eingang ein Gleichrichter gespeist, der die Akkumulatoren lädt. Erst wenn die Netzspannung ausfällt oder außerhalb des Toleranzbereichs liegt, schaltet das USV-System in höchstens 10 ms von der Netzspannungsleitung auf die Backup-Versorgung, die aus Akku und Wechselrichter besteht. Die Umschaltzeit reicht aus, um PC und andere mit Kondensator gepufferte AC-Verbraucher störungsfrei weiter zu betreiben und anschließend, falls erforderlich, kontrolliert runterzufahren.

Im Normalbetrieb sind die Höhe und die Frequenz der Ausgangsspannung direkt von der Eingangsspannung abhängig. Daher wird diese Art von unterbrechungsfreien Stromversorgungen oft als offline oder passiv bezeichnet (Bild4).

VI (Line-Interactive): Beim Line-Interactive-Konzept läuft die akkubetriebene Stromversorgung parallel zur Netzspannungsversorgung. Die Geräte überwachen die tolerierbaren Grenzwerte und halten die Versorgungsspannung über die Regelung und Spannungsverstärkung innerhalb der Grenzwerte. Erst bei Ausfall der Versorgungsspannung schaltet die Elektronik innerhalb von höchstens vier Millisekunden auf Akkubetrieb um (Bild 5).

VFI (online): Bei dieser Betriebsart werden die Verbraucher auch im Normalbetrieb dauerhaft durch den Wechselrichter der USV versorgt. Zuerst wird die Netzspannung gleichgerichtet. Dann generiert der Wechselrichter aus der Gleichspannung eine von der Netzspannung unabhängige Wechselspannung; somit ist das Ausgangssignal der USV (Spannung und Frequenz) vollkommen frei von netzseitigen Störungen. Solche USV werden auch Doppel-Wandler genannt (Bild 6). Netzstörungen werden zu 100% vermieden; die Transferzeit beträgt 0 s. Während des Normalbetriebs wird die Gleichspannung zur ständigen Aufladung der Akkus genutzt. Nachteilig ist der verringerte Wirkungsgrad durch die doppelte Umwandlung und die höhere Belastung der Komponenten durch den Dauerbetrieb. // **KU**

Phoenix Contact

Synchroner Buck/Boost-Regler mit 97% Wirkungsgrad

Zum Einsatz im Kfz mit zwei Batterien (48-V- und 12-V-Bordnetz), etwa bei Hybrid-Elektro- und Mild-Hybrid-Fahrzeugen, sorgt der Synchron-Abwärts-/Aufwärtsregler für eine erhöhte Ausgangsleistung.

Wegen der ständig zunehmenden Anzahl elektronischer Geräte im Automobil stoßen aktuelle 12-V-Bordnetze an ihre Leistungsgrenze von 3 kW. Der kürzlich vorgeschlagene neue Standard LV148 kombiniert das herkömmliche 12-V-Bordnetz mit einem zusätzlichen 48-V-Bordnetz. Das 48-V-Netz umfasst einen riemengetriebenen oder integrierten Startergenerator (BSG, Belt Starter Generator bzw. ISG, Integrated Starter Generator), eine 48-V-Lithium-Ionen-Akku und einen bidirektionalen Gleichspannungswandler, der aus den kombinierten 48- und 12-V-Batterien bis zu 10 kW Leistung herausholt. Diese Technologie ist sowohl für herkömmliche Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch für Hybrid-Elektro- und Mild-Hybrid-Fahrzeuge vorgesehen, die in immer größeren Stückzahlen auf den Markt kommen.

Laut Halbleiterhersteller ist von zentraler Bedeutung, einen Teil der Fahrzeugelektrik mit 48 V zu betreiben, wenn es darum geht, die verfügbare Energie zu erhöhen. Außerdem verringern sich dadurch das Gewicht der Kabelbäume und die kabelbedingten Leistungsverluste. Der LTC3871 unterstützt die bidirektionale DC/DC-Regelung und das bidirektionale Batterieladen für beide Bordnetze (12 und 48 V). Der Controller arbeitet im Abwärtsreglermodus vom 48-V-Netz ins 12-V-Netz, oder umgekehrt im Aufwärtsreglermodus vom 12- ins 48-V-Netz. Der jeweilige Modus wird über ein Steuersignal gewählt. Bis zu 12 Phasen können parallelgeschaltet und gegeneinander versetzt getaktet werden, um die Anforderungen an die Eingangs- und Ausgangsfilter in Hochstromanwendungen (bis 250 A) zu verringern. Die Current-Mode-Architektur des Controllers gewährleistet im Parallelschaltungsbetrieb eine hohe Phasengenauigkeit. Ein 12-phasiges Design kann sowohl im Abwärts- als auch Aufwärtsmodus eine Ausgangsleistung von bis zu 3 kW liefern.

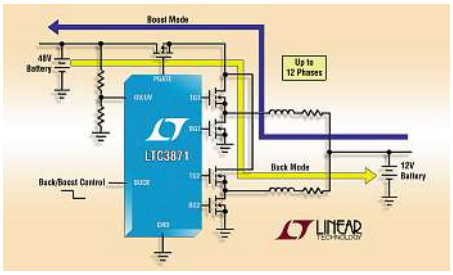


Bild: Linear Technology

Versorgt zwei Bordnetze: *Der bidirektionale DC/DC-Abwärts-/Aufwärtsregler hat eine programmierbare Ausgangsstrom-Überwachung und -Regelung.*

Bei erhöhtem Leistungsbedarf kann der LTC3871 Energie aus beiden Batterien liefern, indem er Energie von einem Bordnetz in das andere umsetzt. In der Regel wird das 12-V-Netz weiterhin die Zündung, die Beleuchtung sowie die Infotainment- und Audio-Systeme versorgen. Das 48-V-Netz wird Systeme wie Fahrgestellregelung, Servolenkung, Klimaanlage, elektrische Turbolader und regenerative Bremsanlagen versorgen. Bis zu 97% Wirkungsgrad sind erreichbar, und der chip-interne Stromregelkreis begrenzt den Strom in beiden Richtungen auf den zulässigen Maximalwert. Vier Regelkreise (jeweils zwei für Strom und für Spannung) sorgen für die Strom- und Spannungsregelung in dem 48- oder 12-V-Bordnetz. // **KU**

Linear Technology

Was Sie über die Lebensdauer von Stromversorgungen wissen sollten

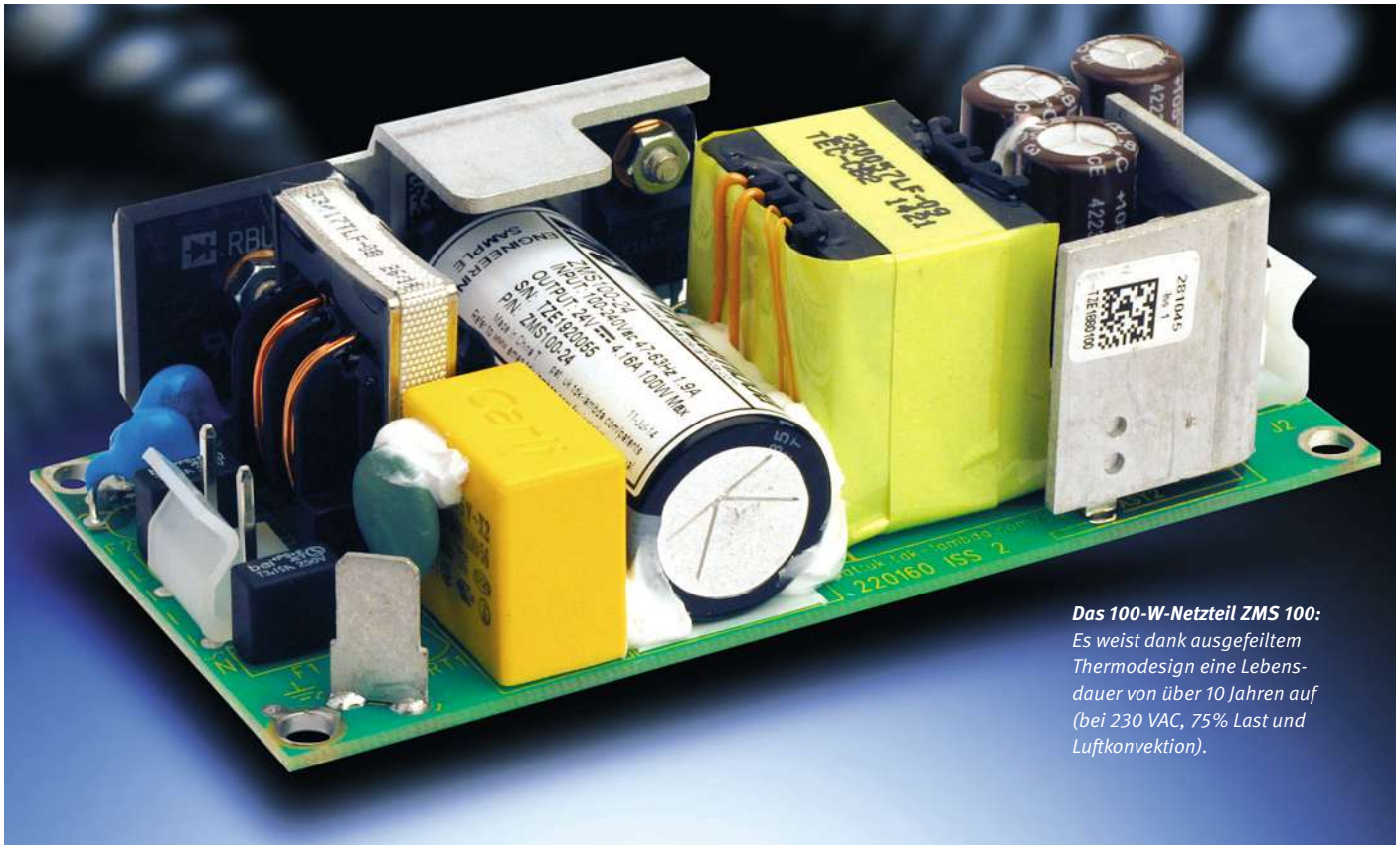
Wie langlebig ist eine Stromversorgung unter den vorgegebenen Einsatzbedingungen im Endgerät? Die Antwort auf diese Frage findet sich nicht einfach als Zahlenwert in den Spezifikationen der Hersteller.

Es war ein schwüler Sommertag. Das Thermometer zeigte 30 °C – und das Display des Magnetresonanztomographen den Ausfall einer Stromversorgungseinheit. Die Maschine war erst fünf Jahre alt. Der sofort kontaktierte Service kündigte sich für den nächsten Morgen an. Zu spät für den Patienten, der bereits im MRT lag und alle anderen im vollen Wartezimmer der radiologischen Praxis. Die Patienten mussten nach Hause geschickt und neue Termine vereinbart werden. Viel Ärger, Verdienstausfall und auch ein Stück weit Vertrauensverlust in die Verfügbarkeit der Technik bei Personal und Patienten.

Und das alles wegen eines Elektrolyt-Kondensators, wie sich später beim Netzteilhersteller herausstellte. Der Kondensator hatte aufgrund der Erwärmung sein Leben ausgehaucht. Dabei war das Medizintechnikunternehmen bei der Auswahl dieser Stromversorgung von einer ausreichend langen Lebensdauer ausgegangen. Als MTBF-Wert, Mean Time Between Failure, wurden vom Hersteller 270.000 h angegeben, das entspricht einer Zeitspanne von 30 Jahren. Weitere Eigenschaften, wie Überlast-, Kurzschluss-, und Überspannungs-Schutz versprachen darüber hinaus ein langes, störungsfreies Produktleben.

Ohne Lüftungsschlitze steigt die Innentemperatur

Der Hersteller hatte sich für Netzteile mit Konvektionskühlung entschieden. Elektrik und Elektronik des MRT-Geräts waren bereits im Labor erfolgreich ausgetestet, als das Produktdesign noch einmal Veränderungen am Gehäuse vornahm. Die Lüftungsschlitze verschwanden und alles sollte kompakter werden. Die Folge war eine Erhöhung der Innentemperatur. Udo Schweizer vom Stromversorgungshersteller TDK-Lambda hält es nicht für abwegig, dass die Änderungen an der Gehäusegestaltung des Kunden für das Versagen des Netzteils verantwortlich waren. Schweizer, als Product Manager und Field Application Engineer für Standard-Einbaustromversorgungen zuständig, wird tagtäglich mit Fragen der Lebensdauer von Stromversorgungen konfrontiert. „10 Kelvin Temperaturerhöhung am Kondensator halbieren die Lebensdauer“, so sein ernüchterndes Resümee.



Bilder: TDK-Lambda

Das 100-W-Netzteil ZMS 100: *Es weist dank ausgefeiltem Thermodesign eine Lebensdauer von über 10 Jahren auf (bei 230 VAC, 75% Last und Luftkonvektion).*

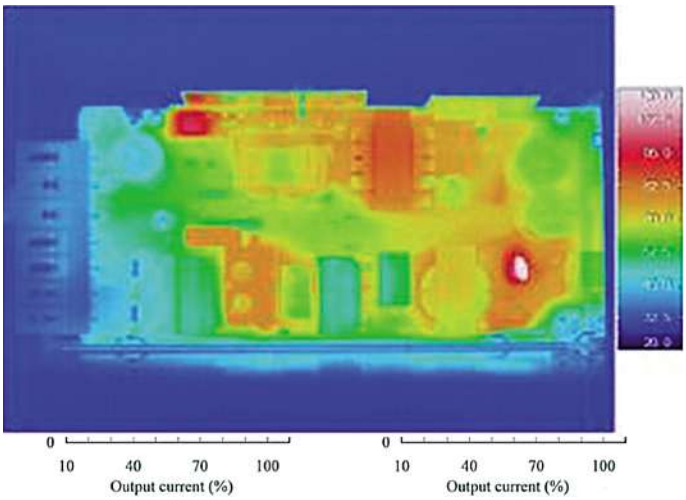


Bild 1: *Die Thermografie gibt Auskunft über die „Lebensbedingungen" der Bauteile in einem Netzteil.*

Am Elko addiert sich zur Umgebungstemperatur die Eigenerwärmung, hervorgerufen durch einen mehr oder weniger ausgeprägten Ripple-Strom in den Elko. Im Industriebereich sind Betriebstemperaturen bis 50 °C der Standard. Angenommen ein 105-°C-Elko mit 10.000 h Lifetime ist bei 50 °C Umgebungstemperatur einer Eigenerwärmung von 25 °C ausgesetzt, das sind 30 K unter Spezifikation. Daraus resultiert eine Lebenserwartung von 80.000 h – etwa 9 Jahren. In besagtem MRT-Gerät treten jedoch in einigen Zonen des Gehäuses bis zu 70 °C und mehr auf. Selbst bei einer deutlich reduzierten Eigenerwärmung lassen sich mit den gebräuchlichen 105 °C Elkos hier nur noch wenige Jahre Lebenserwartung realisieren. Höherwertige Elkos bis 130 °C gibt es zwar, in Standard-Stromversorgungen findet man diese jedoch selten.

Was bei der Evaluation konkret zu beachten ist

Schweizer rät dazu, stets die Einbau- und Betriebssituation der Netzteile zu berücksichtigen. Die Hinweise zur MTBF allein sind keine Entscheidungskriterien: „Die publizierten Spezifikationen der Hersteller liefern keine konkreten Zahlenangaben zur Lebenserwartung der Geräte. Zu viele äußere Faktoren spielen eine Rolle. So dass sich die Lebenserwartung nicht einfach als Zeile unter den Spezifikationen mit auflisten lässt. Die gewährte Garantie gibt sicher einen ersten Anhaltspunkt, wie lange das Gerät wohl halten wird", sagt der Netzteil-Spezialist.

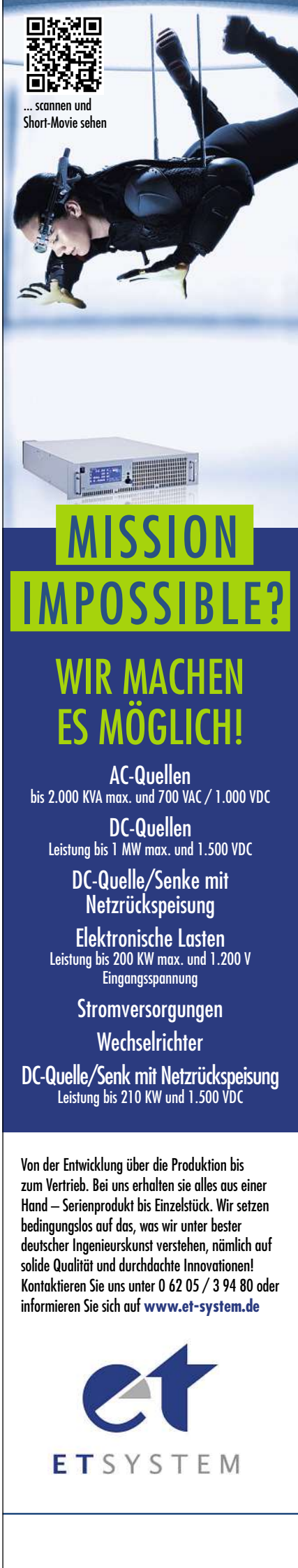
Viele verlassen sich bei der Auswahl der Bauteile auf die Angabe der MTBF. Für diese gibt es verschiedene Berechnungsmethoden – z.B. MIL-HDBK-217, Bellcore/Telcordia oder auch Siemens Norm. Abweichungen um den Faktor 10 bis 50 sind dabei üblich. Ohne konkrete Aussagen zur Berechnungsgrundlage der MTBF sind die Angaben der Hersteller wenig hilfreich. Klammert der Hersteller zudem verschleißanfällige Komponenten wie zum Beispiel Lüfter – aus der Berechnung aus, werden Produktvergleiche erst recht fragwürdig.

Wesentliche Parameter zum Ermitteln der Lebenserwartung

Der MTBF-Wert wird als Kehrwert aus der Addition aller Fehlerraten ermittelt. Welchem Stress jedes Bauteil innerhalb des Gerätes ausgesetzt ist, spielt bei dieser Betrachtung keine Rolle. Doch Auslastung, Temperatur und andere Umgebungseinflüsse sind die maßgebenden Parameter, um die Lebenserwartung eines Gerätes zu ermitteln.

Dabei wären über die Service-Retouren ermittelte, tatsächlich aufgetretene Ausfälle eine viel verlässlichere Quelle für die Lebenserwartung eines Gerätes. Das Problem: Diese Daten werden erst im Laufe der Zeit – oft nach mehreren Jahren – wirklich aussagekräftig. Beim Design der Anwendung liegen meist noch keine verwertbaren Langzeiterfahrungen aus dem Feld vor.

Um Alterung und Verschleiß in einem Netzteil zu bestimmen, werden einige Prototypen eines Gerätes erhöhten Betriebstemperaturen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Mittels dieses sogenannten Highly Accelerated Life Test (HALT) lassen sich Schwachstellen des Designs aufzudecken. Diese Erkenntnisse fließen dann in die weitere Produktentwicklung ein. Obschon HALT sich wenig für eine Prognose zur Ausfallwahrscheinlichkeit im Normalbetrieb eignet, zeigt das Verfahren jedoch eindrucksvoll: bei Standard-Stromversorgungen sind immer die



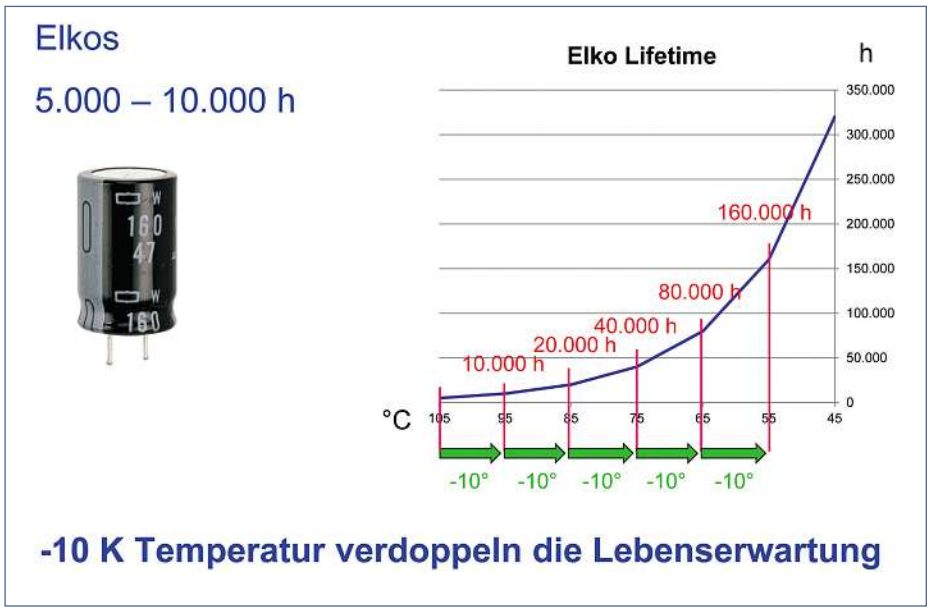


Bild 2: *Einfluss der Temperatur auf die Lebenserwartung eines Aluminium-Elektrolyt-Kondensators.*

gleichen Komponenten für die Lebenserwartung entscheidend. Namentlich: Lüfter, Relais und immer wieder die Elektrolyt-Kondensatoren.

Mit zunehmender Leistung wird ein Lüfter immer wichtiger

Während Relais weitgehend durch Halbleiterelemente ersetzt werden, für die die Zahl der Schaltvorgänge eine untergeordnete Rolle spielt, kommt man an Lüftern nicht vorbei. Gerade in Schaltnetzteilen ab einer Ausgangsleistung von etwa 300 W gewährleisten Lüfter die Kühlung des Netzteiles und wirken sich zunächst einmal positiv auf die Lebenserwartung aus. Gleichzeitig aber unterliegen sie als mechanisches Bauteil dem Verschleiß. Je kleiner der Lüfter, z.B. in hoch integrierten Netzteilbauformen mit 1 HE Front-Ends – desto höher der Verschleiß aufgrund erhöhter Drehzahlen.

Wärme beschleunigt die Alterung der Bauteile und damit ihr Ausfallrisiko, besonders bei Elkos. Somit sind Elektrolytkondensatoren in der Regel das lebenszeitbestimmende Element in jedem Netzteil. Die Lebenserwartung von Elkos wird bei Ihrer spezifizierten Maximaltemperatur angegeben. Bei Erreichen der genannten Lebenszeit hat der Elko aber bereits ca. 20% seiner ursprünglichen Kapazität eingebüßt. Ab diesem Punkt führt der gestiegene Innenwiderstand zu einer immer stärkeren Eigenerwärmung und damit zu einer sich beschleunigenden Alterung, die in absehbarer Zeit zum Ausfall führt. 5000 bis 10.000 h – das bedeutet, dass bei einer Temperatur von 105 °C die Lebenserwartung eines Elkos bei gerade einmal einem Jahr liegt – ein Wert, der weit unterhalb jeder akzeptablen Einsatzdauer eines Endgerätes liegt.

Was ein Hersteller von Stromversorgungen bieten muss

Zunächst sollte es eine Selbstverständlichkeit sein, die Bauteilespezifikation auch unter ungünstigsten Einsatzbedingungen nicht auszureizen. Der Hersteller sollte der Temperaturentwicklung aller Bauteile besonderes Augenmerk schenken. Das Design muss eine zuverlässige Kühlung aller kritischen Bauteile sicherstellen. Insbesondere die Elektrolytkondensatoren sind sorgfältig zu dimensionieren und so innerhalb des Netzteiles zu platzieren, dass ihre Temperatur so gering wie möglich bleibt.

Vor diesem Hintergrund sollten Anwender abwägen, ob das aktuell leistungsstärkste Model innerhalb einer Standardbaugröße – z.B. im 2“-x-4“-Format – die beste Lösung darstellt. Bei extrem kompakten Designs werden möglicherweise Kompromisse eingegangen, die sich negativ auf die Lebenserwartung des Gerätes auswirken.

TDK-Lambda dokumentiert in seinen „Reliability Data“ umfangreiche Informationen zur Temperaturentwicklung. Neben der obligatorischen MTBF-Berechnung findet man dort eine Tabelle zur den Reserven in der Dimensionierung der Bauteile – die „Component Derating List“. Diese Übersicht zeigt, zu wieviel Prozent das Bauteil bei Nennbelastung des Netzteiles tatsächlich ausgelastet ist. Wird ein Transistor bei Einsatz unter Nennlast im Netzteil gerade einmal 99,7 °C warm, obwohl er nach Bauteile-Spezifikation bis zu 150 °C warm werden darf, ist er nur zu 66,5% ausgelastet. Eine Tatsache, die sich sehr positiv auf die Lebenserwartung auswirkt.

Wie der Anwender die Lebenserwartung erhöhen kann

Aber auch Endanwender können etwas für die Lebenserwartung ihrer Stromversorgung im Endgerät tun. Denn was für das Design innerhalb des Netzteiles gilt, das gilt auch beim Einbau des Netzteiles im Endgerät. Entscheidend ist die Temperatur, bei der das Netzteil innerhalb des Endgerätes betrieben wird. Daraus ergibt sich die Entscheidung für das passende Kühlkonzept. Man unterscheidet hier grob vier Arten: Konvektionskühlung, Lüfterkühlung, Kontaktkühlung über eine Baseplate und Kühlung über einen Luftstrom.

Am besten geeignet ist ein Bereich mit möglichst geringer Wärmeentwicklung und ausreichend Freiraum zur Luftzirkulation, bzw. gut gekühlt durch Luftstrom, Lüftungsschlitze usw.

„Wie stark ist die Temperaturerhöhung innerhalb des Endgerätes gegenüber der Umgebungstemperatur? Wie wärmedurchlässig ist das Gehäuse des Endgerätes? Kann die innerhalb des Gehäuses entstehende Wärme schnell an die Umgebung abgegeben werden, oder bildet sich ein Wärmestau?“ fragt Udo Schweizer und warnt: „Möglichst kompakte Gehäuse sind sicher chic und der Verzicht auf Lüftungsöffnungen ist je nach Einsatzfeld zwingend – aber die Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung im Gerät dürfen nicht außer Acht gelassen werden!“

Der Aufstellort beeinflusst die Gerätetemperatur

Was Entwickler auch beachten sollten: den Einfluss des Aufstellorts auf die Temperatur des Endgerätes. Auch Sonneneinstrahlung und benachbarte Geräte können die Betriebstemperatur deutlich erhöhen. Und selbst jahreszeitliche Einflüsse können eine Rolle spielen. Weniger problematisch sind jahreszeitliche Schwankungen mit wenigen, heißen Hochsommertagen und überwiegend moderateren Bedingungen. Stellt die Spezifikation eine Maximalanforderung dar, die nur in seltenen Fällen wirklich benötigt wird? Dann kann die Kalkulation der Lebenszeit des Gerätes auf den typischen Einsatzbedingungen beruhen, mit einem eventuell früheren Ausfall bei den wenigen Extremanwendungen. // **TK**

TDK-Lambda
+49(0)7841 6660

DC/DC-WANDLER

Bahntauglich mit 4:1 Eingang

Die isolierten 20-W-DC/DC-Wandler der RP20-FR-Serie von RECOM wurden speziell für Anwendungen in der Bahntechnik entwickelt, eignen sich aber auch hervorragend für Anwendungen in Industrie und Telekommunikation. Die 2“x1“-Module bieten einen 4:1-Eingangsspannungsbereich (9 bis 36 V, 18 bis 75 V, 43 bis 160 V) und decken somit alle in der Norm ausgewiesenen Batterie-Bordnetze inklusive des geforderten ±40%-Toleranzbereichs ab. Neben den Varianten mit 3,3, 5, 12 und 15V mit single Ausgang sind auch Dual-Varianten mit ±12 und ±15 V verfügbar. Die Control-Pin-Logik kann positiv oder negativ gewählt werden. Die Wandler weisen einen Wirkungsgrad von 89% und einen weiten Arbeitstemperaturbereich von –40 bis 85 °C auf (HC-Version). Die Kühlung erfolgt grundsätzlich durch natürliche Konvektion; wenn es die Applikation erfordert, können die Wandler auch mit vormontiertem Kühlkörper geliefert werden. Die Module sind sowohl EN50155- inklusive EN50121-1-3-2- und EN61373-zugelassen als auch UL/cUL-60950-1-zertifiziert. Für die Module gilt eine 3-jährige Herstellergarantie.

RECOM

EINBAU-NETZTEILE

Effiziente 350 W mit Konvektionskühlung

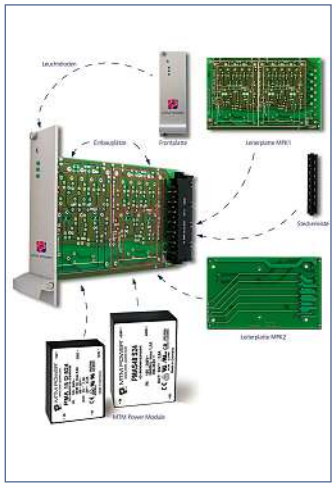
Die Einbau-Netzteile der Reihe CUS350M von TDK-Lambda mit 350 W Nennausgangsleistung bei Konvektionskühlung haben die Medizin- und die ITE-Zulassung (IEC 60601-1, IEC 60950-1). Sie kommen ohne Zwangsbelüftung aus und eignen sich deshalb für Anwendungen, bei denen Lüftergeräusche unerwünscht sind. Die Netzteile arbeiten mit 85 bis 264 V_{AC} Eingangsspannung, sind mit 12, 18, 24 oder 48 V_{DC} Nennausgangsspannung verfügbar und haben einen Leerlaufverbrauch von <0,5 W. Mit bis zu 94% Wirkungsgrad übertreffen sie die Forderung der ErP-Richtlinie. Die Geräte sind bei zwischen –20 und 40 °C mit voller Nennlast belastbar, bis 70 °C mit Derating. Die Isolationsspannung der CUS350M-Reihe beträgt 4000 V_{AC} (2 x MOPPs) zwischen Ein- und Ausgang, 2000 V_{AC} (1 x MOPP) zwischen Eingang und Masse sowie 1500 V_{AC} zwischen Ausgang und Masse (BF rated). Die Sicherheitszulassungen umfassen IEC/EN 60601-1, ANSI/AAMI ES 60601-1 und IEC/EN/UL/CSA

60950-1, und die Geräte tragen das CE-Zeichen gemäß der Niederspannungs- und der RoHS2-Richtlinie.

TDK Corporation

MULTI-POWER-KARTE

Ein Produkt mit 1000 Möglichkeiten



Die Multi-Power Karte MPK von MTM Power ist eine 19"-Europakarte mit bis zu sechs galvanisch getrennten Ausgängen in 6 oder 8 TE. Sie ermöglicht bis 100 W eine einfache Bereitstellung fast jeder gewünschten Ausgangsspannungskonfiguration. Wie in einem Baukasten lassen sich mit den Basiskomponenten Frontplatte, Leiterkarte und H15-Steckverbinder sowie den vakuumvergossenen Modulen der PMA-, PMAS-, PMN- und PMG-Serien die 19"-Stromversorgungen individuell zusammenstellen. Auf Wunsch kann auf der Frontplatte für jeden Ausgang eine separate LED-Anzeige vorgesehen werden. Die Kombinationsmöglichkeiten bestehen zwischen allen Modulen mit gleicher Eingangsspannung. Da bei den Stromversorgungsmodulen selbst kundenspezifische Ausführungen über gleiche Abmessungen und Anschlüsse verfügen, lassen sich auch Sonderausführungen mit Standardmodulen kombinieren.

MTM

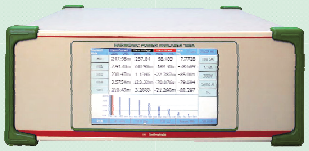
HEIDEN
COMPETENCE IN POWER

Stromversorgungen
in allen Leistungsklassen
AC- und DC-Quellen, elektronische Lasten, Quelle-Senken Systeme
bidirektional mit Netz-Rückspeisung
für Forschung und Industrie mit höchster Leistung und Dynamik.

Quelle-Senke Systeme

mit Netz-Rückspeisung

NEU - Präzision
Leistungs-Analysator



1- bis 6-Kanal **108A**
DC bis 2 MHz Bandbreite
± 0,02% Genauigkeit
0,3V bis 1000V / 50µA bis 40A

HEIDEN ist Ihr Partner für:

- Power Supply/arbitrary
- elektronische Lasten, **NEU** mit Netz-Rückspeisung
- AC-Quelle/Freq.Wandler
- Leistungs-Analysatoren
- Meßgeräte
- System-Lösungen
- **HTS14:** Quelle-Senke mit Netz-Rückspeisung bis 1000V und bis ± >1000A

Auch kundenspezifische Lösungen. Seit über 40 Jahren Ihr zuverlässiger Partner vor Ort in Sachen POWER.

HEIDEN power GmbH
Tel.: +49-8196-9988-0
Fax: +49-8196-998877
info@heidenpower.com
www.heidenpower.com

HEIDEN
COMPETENCE IN POWER

Neuregelungen für Netzgeräte sorgen für ein effizienteres IoT

Neueste Netzgeräte, die den Level-VI-Anforderungen des US-Energieministeriums entsprechen, erhöhen den Wirkungsgrad netzabhängiger IoT-Gateways. Hier erfahren Sie, warum das so ist.

JEFF SCHNABEL *

Bild: © iconimage/ Fotolia.com, CUI

Bild 1: *Mit neuesten Netzgeräten, die den Level-VI-Anforderungen entsprechen, lässt sich der Wirkungsgrad netzabhängiger IoT-Gateways erhöhen.*

Milliarden „Dinge“ werden in den nächsten Jahren über das Internet vernetzt, aber nicht alle davon werden einzelne IP-adressierbare Sensoren sein. Bei vielen wird es sich um Gateways handeln, die Daten von einer Vielzahl von Geräten sammeln – über Verbindungen wie Bluetooth, proprietäre stromsparende Funktechnik oder verdrahtete Punkt-zu-Punkt- oder Feldbus-Verbindungen. Zusammen mit diesen Geräten kann das IoT Daten von mehr als einer Billion Sensoren verarbeiten und in der Cloud speichern.

*** Jeff Schnabel**
... ist Vice President of Global Marketing bei CUI.

Ein großer Teil der IoT-Entwicklungen konzentriert sich auf äußerst energieeffiziente Designs, damit Endpunkte wie intelligente Sensoren lange Zeit mittels Batterie oder mittels Energy Harvesting aus der Umgebung betrieben werden können. Gateways benötigen allerdings wesentlich mehr Strom als eine kleine Batterie oder ein Energy-Harvesting-System bereitstellen kann.

Mit externen Netzteilen wird vieles einfacher

Im Gegensatz zu Sensoren, die an bestimmten Stellen platziert werden müssen,

Bild: CUI

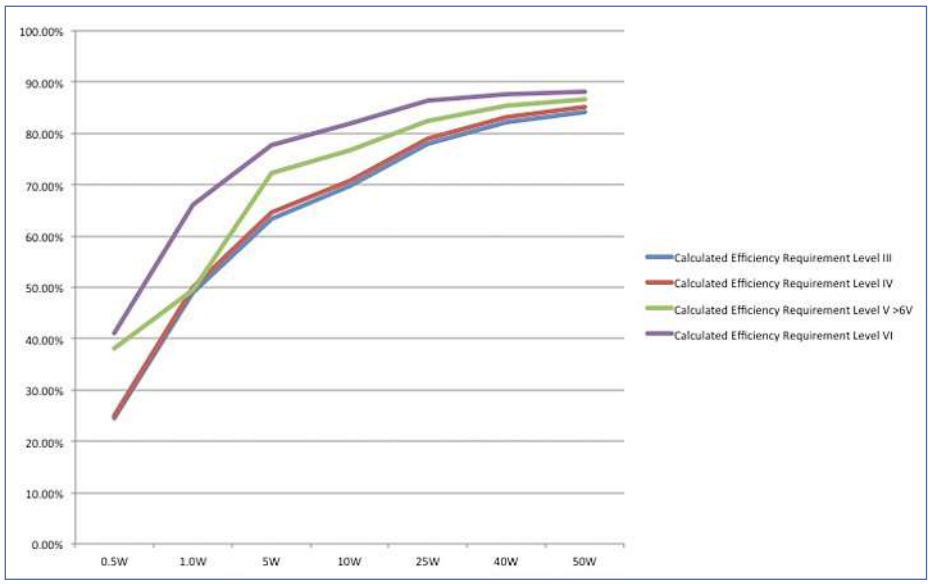


Bild 2: *Der durchschnittliche Wirkungsgrad nach Level VI ist wesentlich höher als bei früheren Spezifikationen.*

bieten Gateways mehr Flexibilität, um in der Nähe einer Stromquelle, z.B. einer Steckdose, positioniert zu werden. Wird ein externes Netzteil verwendet, um die Low-Voltage-DC-Versorgung des Gateways bereitzustellen, lässt sich der interne Schaltkreis des Gateways vereinfachen und die Verantwortung hinsichtlich der Sicherheits- und Wirkungsgrad-Standards an den Anbieter des Netzteils auslagern.

Netzteile werden von Jahr zu Jahr immer effizienterer

Entwickler aller Arten von OEM-Systemen wählen bei der Stromversorgung seit Jahrzehnten externe Netzteile. Diese sind so erfolgreich, dass Marktforscher bereits vor langer Zeit (in den 1990-er Jahren) Stückzahlen in Milliardenhöhe voraussagten. Eine Studie von Alan Meier am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) sagte bereits 1998 voraus, dass etwa 5% des gesamten Stromverbrauchs in US-Haushalten (was einem Wert von 3 Mrd. US-$ entspricht) durch Netzteile verschwendet wird, sobald sich das angeschlossene Gerät im Standby-Modus befindet. Dieser Prozentsatz werde sich in den nächsten 20 Jahren auf 30% erhöhen, sofern keine Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Energieeffizienz-Richtlinien gibt es seit 2004

Die erste gesetzlich vorgeschriebene Energieeffizienz-Richtlinie für externe Netzteile wurde im Jahr 2004 in Kalifornien eingeführt. Ähnliche Standards folgten weltweit und wurden als das „International Energy Efficiency Marking Protocol“ für externe Netzgeräte harmonisiert. Die Weiterentwicklung der Richtlinie hat zu immer strengeren Grenzwerten im Leerlauf-/Standby-Betrieb sowie zu einem Mindestwert für den durchschnittlichen Wirkungsgrad geführt.

DoE-Standard Level VI gilt seit 10. Februar 2016

Im Jahr 2014 hat das US-Energieministerium (DoE; Department of Energy) angekündigt, dass alle externen Netzteile, die nach dem 10. Februar 2016 gefertigt und in den USA verkauft werden, den neuen Wirkungsgrad-Richtlinien nach Level VI entsprechen müssen. Die EU und andere Länder verfolgen derzeit die Regelungen entsprechend Level V und werden demnächst eigene Anforderungen entsprechend Level VI verabschieden – offzielle Bekanntmachungen gibt es allerdings noch nicht.

Die Level-VI-Spezifikation soll Strom sparen

Die neue Regelung trifft auf alle externen Netzteile zu – ob sie nun als eigenständige Produkte oder zusammen im Paket mit OEM-Geräten wie Notebooks, Smartphones, Tablets, Drucker, Internet-Hubs, Router und IoT-Gateways ausgeliefert werden. Mit dem erwarteten rasanten Anstieg an IoT-Anwendungen sollen die Level-VI-Spezifikation zu mehr Stromeinsparung und Umweltschutz beitragen, vor allem wenn immer mehr IoT-Gateways an das Stromnetz angeschlossen werden.

CUI begann Ende 2014 damit, Level-VI-Netzgeräte auszuliefern, um dieser neuen

ART DES NETZTEILS		≤1 W	1 – 49 W	49 – 250 W	≥250 W
Single-Voltage AC/DC (Ausgang >6 V)	Leerlauf max.	0,1 W	0,1 W	0,21 W	0,5 W
	Dynamischer Wirkungsgrad (min.)	$0,5 \times P_{out} + 0,16$	$0,071 \times \ln(P_{out}) - 0,0014 \times P_{out} + 0,67$	0,880	0,875
Single-Voltage AC/AC	Leerlauf max.	0,21 W	0,21 W	0,21 W	0,5 W
	Dynamischer Wirkungsgrad (min.)	$0,5 \times P_{out} + 0,16$	$0,071 \times \ln(P_{out}) - 0,0014 \times P_{out} + 0,67$	0,880	0,875
Low-Voltage AC/DC (Ausgang <6 V)	Leerlauf max.	0,1 W	0,1 W	0,21 W	0,5 W
	Dynamischer Wirkungsgrad (min.)	$0,517 \times P_{out} + 0,087$	$0,0834 \times \ln(P_{out}) - 0,0014 \times P_{out} + 0,609$	0,870	0,875
Low-Voltage AC/AC	Leerlauf max.	0,21 W	0,21 W	0,21 W	0,5 W
	Dynamischer Wirkungsgrad (min.)	$0,517 \times P_{out} + 0,087$	$0,0834 \times \ln(P_{out}) - 0,0014 \times P_{out} + 0,609$	0,870	0,875
Mehrere Spannungen	Leerlauf max.	0,3 W	0,3 W	0,3 W	-
	Dynamischer Wirkungsgrad (min.)	$0,497 \times P_{out} + 0,067$	$0,075 \times \ln(P_{out}) + 0,561$	0,860	-

Tabelle: *Leerlauf-Leistungsaufnahme und dynamischer Wirkungsgrads entsprechend der Level-VI-Richtlinien.*

Regelung zu entsprechen. Hersteller von Netzgeräten passen ihr Angebot entsprechend an, um die jeweils strengsten Richtlinien zu erfüllen. OEM-Kunden können dann den Wirkungsgrad maximieren und Fehler in der Versorgungskette vermeiden, indem ein gemeinsames Netzteil den Produkten beigelegt wird, die für verschiedene Exportmärkte bestimmt sind.

Die Level-VI-Richtlinie ist wesentlich komplexer als der Vorläufer und definiert fünf Kategorien von Netzteilen und zum ersten Mal auch Geräte mit einer Nennleistung über 250 W. Die oben abgebildete Tabelle listet die angegebene Leistungsaufnahme im Leerlauf und den durchschnittlichen Wirkungsgrad für alle Kategorien auf.

IoT-Gateways benötigen nur wenig Leistung

IoT-Gateways benötigen wohl kaum 250 W Leistung oder Netzteile mit mehreren Ausgangsspannungen. Eher wahrscheinlich ist ein AC/DC-Netzteil mit einer einzigen Ausgangsspannung (über 6 V) oder ein Low-Voltage-Netzteil (<6 V) im Bereich <1 W oder 1 bis 49 W. Bild 2 vergleicht die Level-VI-Spezifikationen für den durchschnittlichen Mindestwirkungsgrad bei einer einzigen Ausgangsspannung (>6 V) zu den Spezifikationen nach Level III, IV und V.

Der Grenzwert ist eindeutig höher für Geräte im Leistungsbereich 0,5 bis 5 W, die höchstwahrscheinlich die meisten IoT-Gateways mit Strom versorgen werden. Je nach Anwendung kann der Gateway Sleep-Modi und einen stromsparenden Leerlaufmodus entsprechend der Level-VI-Spezifikation bieten. Andere Anwendungen können zudem fordern, dass der Gateway ständig in Betrieb ist.

Level-VI-Spezifikationen sind eine große Herausforderung

Die neuen Level-VI-Spezifikationen stellen Entwickler von Stromversorgungen und Netzteilen vor große Herausforderungen. Im Vergleich zu CUIs Level-V-Netzteilen weisen Level-VI-Geräte Änderungen bei nahezu allen Aspekten der Primär- und Sekundärschaltkreise auf. Dazu zählen neueste Steuerungs-ICs, die verbesserte Betriebsmodi bei geringer Last unterstützen: im Normalbetrieb arbeiten die Controller mit der gleichen Schaltfrequenz (65 kHz) wie in Level-V-Produkten, schalten bei geringer Last oder im Leerlauf aber auf 22 kHz, um die Verlustleistung zu verringern und den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die Kondensator- und Widerstandswerte im sekundären Rückkopplungskreis wurden ebenfalls optimiert, um die Auswirkungen hoher Restwelligkeit und Störungen bei geringeren Schaltfrequenzen zu mindern. Der Controller basiert auf neuester Technik, um die Ruhestromaufnahme zu verringern, was den hohen Anforderungen hinsichtlich des Stromverbrauchs im Leerlauf entgegen kommt.

Änderungen im Sekundärkreis verbessern den Wirkungsgrad

Zu den Änderungen im Sekundärkreis von Low-Voltage/High-Current-Level-VI-Netzteilen zählen eine synchrone Gleichrichtung mit MOSFETs und ein spezieller Controller anstelle einer einfachen Diodengleichrichtung. Zu den weiteren Änderungen zählen optimierte Widerstandswerte und größere Drahtquerschnitte, um die interne Verlustleistung zu verringern. Neueste MOSFETs mit geringem Durchlasswiderstand tragen dazu bei, den Wirkungsgrad bei hoher Last zu verbessern.

Der Hauptstromversorgungskreis ist im Wesentlichen genauso ausgeführt wie bei den vorherigen Level-V-Netzteilen. Netzteile mit <120 W Leistung basieren auf CUIs bewährtem Flyback-Design, während Geräte mit >120 W Leistung eine LLC-Resonanztopologie aufweisen. Der höhere durchschnittliche Wirkungsgrad der Level-VI-Netzteile trägt auch dazu bei, die Betriebstemperatur zu verringern, was letztendlich die Zuverlässigkeit erhöht. In IoT-Anwendungen kann sich dies als wichtiger Vorteil erweisen, da die Geräte oft sehr lange Zeit im Feld zum Einsatz kommen – meist mit geringer oder gar keiner Wartung.

Verbesserungen für das IoT und für die Umwelt

Die US-Umweltbehörde (EPA; Environmental Protection Agency) gab bekannt, dass die Regelungen bezüglich externer Netzteile im letzten Jahrzehnt bereits zu einer Verringerung der CO_2-Emissionen um mehr als 24 Mio. Tonnen pro Jahr und zu Einsparungen von mehr als 2,5 Mrd. US-$ jährlich beitragen. Das US-Energieministerium geht nun davon aus, dass mit Level VI an die 47 Mio. Tonnen CO_2 eingespart werden können. Hersteller von Geräten wie IoT-Gateways müssen also stets auf dem neuesten Stand der Technik bezüglich der Netzteile und des Stromverbrauchs sein. // **TK**

CUI

NETZTEILE

Kundenspezifische Steckverbinder

Das 150-W-Tischnetzteil BET-1500 von Bicker Elektronik ist mit exakt geregeltem +12-, +19- oder +24-V_{DC}-Ausgang und mit kundenspezifischen Spezial-Steckverbindungen verfügbar, optional auch mit weiteren Spannungen. Es benötigt keine Grundlast und arbeitet im Temperaturbereich von –30 bis 65 °C. Mit einem Wirkungsgrad von bis zu 93% und einem Standby-Stromverbrauch von <0,15 W entspricht es den aktuellen Energie-Effizienz-Bestimmungen für die USA und Europa. Neben den Energie-Effizienzlevel-Standards DoE (US-Energieministerium), CEC, GEMS, NRCan Level VI und ErP Level V erfüllt das BET-1500 auch den EU-Tier-2-Standard. Das BET-1500 ist ausschließlich mit 105-°C-Premium-Elektrolyt-Kondensatoren bestückt und für den langjährigen 24/7-Dauerbetrieb ausgelegt. Es hat einen Weitbereichseingang von 90 bis 264 V_{AC} (50 bis 60 Hz) und die notwendigen Sicherheitszulassungen IEC/EN/UL60950-1, CCC und CE. Die Isolationsspannung zwischen Ein- und Ausgang beträgt 4242 V_{DC}. Neben dem regulären 4-PIN-POWER-DIN-Stecker kann das BET-1500 am DC-Ausgang mit kundenspezifischen Spezial-Steckverbindungen ausgestattet werden.

Bicker Elektronik

USB-STECKERNETZTEILE

Mit minimalen Standby-Verlusten

Ab sofort sind die hocheffizienten Steckernetzteile von Artesyn Embedded Technologies über FORTEC erhältlich. Über ihren Standard-USB-Anschluss liefern die Serien DA5 und DA10 Ausgangsleistungen von 5 bzw. 10 W. Eingangsseitig sind die Netzteile mit Steckern für die weltweit wichtigsten Netzanschlüsse erhältlich. Beide Serien nutzen Artesyns integrierte primärseitige Regelungsarchitektur, die ein einfaches und damit kostengünstiges Schaltungsdesign ermöglicht. Sicherheitsschaltungen gegen Überspannung, Überstrom und Übertemperatur sind integriert. Der Arbeitstemperaturbereich beginnt bereits bei –10 °C. Daher eignen sich diese Netzteile sowohl für Consumer-Applikationen als auch für anspruchsvolle Anwendungen, etwa portable Messgerät für den Feldeinsatz in Industrie und Service. Alle Modelle erfüllen die verschärften und seit Februar auf dem amerikanischen Markt geltenden Energieeffizienz-Vorschriften nach DoE Level VI. Darüber hinaus sind beide Serien sowohl nach dem aktuellen Sicherheitsstandard 60950-1 als auch nach der kommenden Norm 62368-1 zertifiziert.

FORTEC

POWER SUPPLIES MADE IN GERMANY

Am Standort Deutschland entwickelt und produziert MTM Power vakuumvergossene (EP 1 987 708, U.S. Patent No. 8,821,778 B2) Stromversorgungen für anspruchsvolle Anwendungen in rauer Industrieumgebung.

Vertrauen Sie MTM Power - führender Power Supply Spezialist in Deutschland.

www.mtm-power.com

25 YEARS
MTM POWER®

A NEW LOW!

THE NEW (M)ULP ULTRA LOW PROFILE SERIES

THE WORLD'S SMALLEST AND FLATTEST POWER SUPPLY

(M)ULP275

5 x 3 x 0.75 INCHES

150 W CONVECTION-COOLED

EFFICIENCIES UP TO 93%

BF RATING FOR MEDICAL VERSIONS

PG/PF SIGNAL OPTION

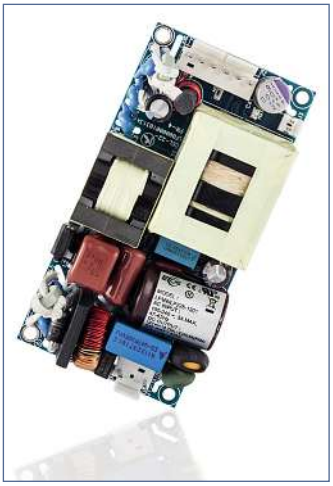
12 V/0.5 A FAN OUTPUT STANDARD

EOS CELEBRATING 25 YEARS 1991-2016

www.eospower.com

DACHZEILE

225/350-Watt-Netzteil für -ITE und Medical



Günter Power Supplies bietet die Low Profile Serie (M)WLP225 und (M)WLP350 vom Hersteller EOS Power als Open Frame an. Mit Ausgangsspannungen zwischen 12 und 58 V, Schutzklasse I oder II (225 W) / Schutzklasse I (350 W) und einer Baugröße von nur 4 Zoll x 2 Zoll x 1 Zoll (225 W) und 5 Zoll x 3 Zoll x 1 Zoll (350 W) erhält der Anwender ein Gerät mit hervorragenden Eigenschaften zu einem sehr guten Preis-Leistungs-Verhältnis. Die Geräte arbeiten bis 112,5 W/200 W mit Konvektionskühlung und 225 W/350 W werden mit Lüfter erreicht. Die Stromversorgung wird vielen Anforderungen gerecht, so erstreckt sich der Betriebstemperaturbereich von –40 bis 50 °C, mit Derating bis 70 °C, die Leerlaufleistung liegt unter 0,5 W, der Wirkungsgrad beträgt bis zu 94% und die MTBF ist >800.000 h. Die neue (M)WLP225/350 Serie ist nach EN60601 3rd Edition und EN60950 2nd Edition zugelassen.

Günter Power Supplies

AC/DC-WANDLER

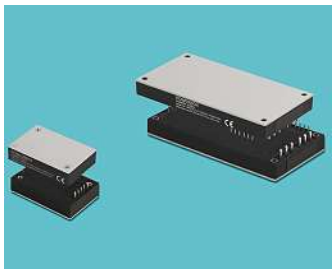
Für raue Industrieumgebungen

Das AC/DC-Wandlermodul RAC20-N von Recom für die Leiterplattenbestückung hat die Maße 2" x 1" und eignet sich für den Einsatz in rauen Industrieumgebungen. Der Wandler mit Universaleingang (90 bis 264 V_{AC}) ist pinkompatibel mit den Modellen RAC05-SC, RAC06-SC, RAC10-SC und RAC20-SB. Die 20-W-Stromversorgung der Schutzklasse II hat 3,3-, 5-, 12-, 15- und 24-V_{DC}-Ausgänge und erzielt einen Wirkungsgrad bis 83%. Mit einer Leerlauf-Leistungsaufnahme von <0,25 W entspricht der Wandler der ErP-Ökodesign-Richtlinie. Die robuste Bauweise erlaubt einen Einsatz im Betriebstemperaturbereich von –40 bis 70 °C. Über Einpressmuttern ist eine sichere Befestigung bei starken Schocks und Vibrationen im rauen Umfeld möglich. Schutz vor Kurzschluss, Überlast, Überspannung und die elektromagnetische Verträglichkeit nach EN55022 Klasse B runden die Features ab. Der RAC20-N ist sowohl IEC, UL als auch EN60950-1 zertifiziert und mit CE-Kennzeichnung ausgestattet. Anwender erhalten eine Garantie von drei Jahren auf den AC/DC-Wandler von Recom.

Recom

DC-DC HOCHLEISTUNGSWANDLER

Optimiert für die Industrie- und Bahntechnik



Powerbox hat zwei DC/DC-Wandler für die Leiterplattenmontage vorgestellt, die in erster Linie für industrielle und bahntechnische Anwendungen gedacht sind: Den PQB50U-72S mit besonders weitem Eingangsbereich sowie den PFB600W-110S mit extrem hoher Leistungsdichte. Der PQB50U-72S mit seinem großen Eingangsspannungsbereich von 12:1 (14 bis 160 V) liefert 50 W in einem Quarter-Brick-Gehäuse und vereinfacht die Arbeit von Entwicklern, die EN50155-Lösungen entwerfen. Der Baustein kann alle gängigen Busspannungen verarbeiten. Der PQB50U-72S kann die volle, stabile Leistung im Bereich von 14 bis 160 V liefern. Der PFB600W-110S im Full-Brick-Gehäuse ist der erste industrielle 600-W-Wandler mit einem 4:1-Eingangsbereich (43 bis 160 V), der die nominellen Busspannungen 72, 96 und 110 V abdeckt. Beide Bausteine können bei Gehäusetemperaturen zwischen –40 und 100 °C betrieben werden und damit sehr herausfordernde Anforderungen erfüllen, wie sie beispielsweise für Baumaschinen, Anlagen im Bergbau und der Schwerindustrie bestehen.

Powerbox

NETZTEILE

Effizienz übertrifft 80 PLUS Platinum

Die 650-W-Netzteile der Serie D1U54P-650-12-HBxC von Murata Power Solutions haben im 1U-Industriestandard-Format die Maße 54,5 mm x 40 mm, allerdings bei einer Länge von nur 228,6 mm, während die übrigen Netzteile dieser Serie 304,8 mm lang sind. Mit einer Leistungsdichte von 21,4 W pro Kubikzoll übertrifft diese Stromversorgung die Effizienz-Anforderungen gemäß 80 PLUS Platinum. Neben einem Primärausgang mit 12 V_{DC} bietet das Netzteil einen Standby-Ausgang mit 12 V_{DC} und 2 A. Die hot-plug-fähigen Netzteile eignen sich für N+1-Redundanz-Konfigurationen und es lassen sich bis zu acht Einheiten parallel schalten. Die Netzteile haben eine I²C-konforme PMBus-Schnittstelle. Die für Wechselspannung vorgesehene Version D1U54P-W-650 hat einen Universaleingang für Spannungen von 90 bis 264 V_{AC}. Die alternativ erhältliche Version D1U54-D-650 mit Gleichspannungs-Eingang hat die gleichen Maße. Die für dezentrale Stromversorgungs-Architekturen vorgesehene Serie

D1U54P-x-650 eignet sich ideal für den Einsatz in Netzwerk-Equipment sowie in Server- und Massenspeichersystemen.

Murata Power Solutions

NETZTEIL-SERIE

200 Systeme mit unterschiedlichen Leistungsdaten

Der schwedische Netzteilhersteller Powerbox hat die Standard-AC/DC-Netzteilfamilie „Industrial Line“ vorgestellt, die mit über 200 Produkten eine große Auswahl an Leistungsklassen, Ausgangsspannungen, mechanischen Formaten und Optionen für die optimale Kühlung bietet. Dazu gehören Netzteile mit Einfach-, Zweifach- und Mehrfachausgängen in einem Leistungsspektrum von 150 bis 650 W. Die mechanischen Formate reichen von Open-Frame, über U-Profil bis hin zu Varianten im geschlossenen Gehäuse, inklusive einer Version, die die volle Leistung bei natürlicher Konvektion im Betriebstemperaturbereich von –20 bis 50 °C bietet. Die Wandler mit Einfachausgang basieren auf einer LLC-Halbbrücken-Topologie, in den meisten Versionen ergänzt mit einer synchronen Gleichrichtung, bei der die Dioden des Ausgangsgleichrichters durch MOSFETs ersetzt werden. Mit Hilfe dieser Technologie sind Netzteileigenschaften wie ein Wirkungsgrad bis 93%, hohe Energiedichte, hoher Peak-Ausgangsstrom sowie ein überragendes EMV-Verhalten möglich, das die EN55022B erfüllt und sogar übertrifft. Weitere Eigenschaften sind ein Weitbereichseingang, eine niedrige Leerlauf-Verlustleistung, sowie ein hoher MTBF. Alle Produkte verfügen über PFC und erfüllen die EN61000-3-2 Klasse D. Die niedrige Leerlauf-Verlustleistung ermöglicht in Verbindung mit dem hohen Wirkungsgrad ein umweltfreundliches Energieprofil.

Powerbox

1500-WATT-NETZTEIL

Mit Leistungsfaktorkorrektur 0,99 bei voller Last

Die programmierbare AC/DC-Stromversorgung Genesys 100-15 im 1U-Rack liefert bis zu 1500 W. Die Ausgangsspannung ist bis 100 V mit einer Genauigkeit von 0,01% bzw. 2 mV einstellbar. Die Stromversorgung wird von Rosenkranz Elektronik angeboten und bietet ein hohe Leistungsdichte, geringen Ripple von 8 mV_{eff} und Schnittstellen wie LXI und USB. Der Eingangsspannungsbereich reicht von 85 bis 265 V_{AC} (einphasig, 50/60 Hz). Das Netzteil entspricht den europäischen EMV-Anforderungen und verfügt über aktive Leistungsfaktorkorrektur von 0,99 bei voller Last, was einen sicheren Betrieb in schwieriger AC-Umgebung ermöglicht. Die Frontplatte ermöglicht zuverlässiges Einstellen durch Encoder für Grob- und Feineinstellung (6 oder 30 Umdrehungen) und 4-Digit-LED-Display für Spannung und Strom. Einstellbare OVP, UVL und Strom-Foldback bieten hohe Flexibilität. Eingestellte Werte erscheinen auch bei abgeschaltetem Ausgang auf dem Display. Die Foldback-

Strombegrenzung ermöglicht das Abschalten des Ausgangs, falls dies aus Sicherheitsgründen erforderlich ist.

Rosenkranz-Elektronik

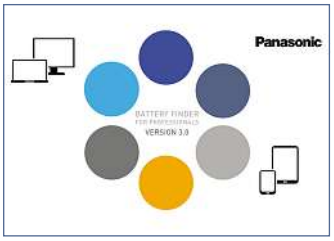
BICKER.de ELEKTRONIK
DC-DC KONVERTER MIT SUPERCAP USV
NEU!
Super CAPS
16...32 V EINGANG
DC2412-UPS | 12V / 5A
Ausfallsicherer 12V-Ausgang
Wartungsfrei und lüfterlos
Kurze Ladezeit < 60 Sekunden
RS232-Interface / Relaiskontakt
Temperaturbereich -20...+70°C
3 Jahre Garantie
Bicker Elektronik GmbH
www.bicker.de

ELEKTRONIK PRAXIS
MAGAZIN-NEWSLETTER
NEWS
JETZT ANMELDEN
Aktuelle Ausgaben **digital und kostenlos** lesen.
www.elektronikpraxis.de/newsletter

BATTERIEN UND AKKUS

Battery Finder App hilft bei der Batterie- und Akkusuche

Panasonic Automotive & Industrial Systems Europe (PAISEU) bietet allen Batterie-Suchenden jetzt ein ganz besonderes Arbeitsmittel an: die brandneue dritte Version seiner Battery Finder App. Hier finden sich Hunderte von Industriebatterien und eine Vielzahl von Infos, Bildern und Videos zur Batterietechnik. Das Tool hilft dabei, immer genau die richtige Batterie für den speziellen Bedarf zu finden. Neben der Smartphone App gibt es auch eine neue Version der Online-Applikation, die für Computer oder Tablets optimiert ist. Wer mehr erfahren möchte, kann sich ein Erklärungsvideo auf der Panasonic Website oder bei YouTube ansehen. Vom Akku-Bohrschrauber bis zur USV-Anlage, vom Rauchmelder bis zur Windkraftanlage – überall werden leistungsfähige Batterien in der Industrie eingesetzt. Und die Menge der Anwendungen, die Batteriekraft benötigen, wächst schnell. Entsprechend groß und unübersichtlich ist das Angebot am Markt. Da ist es nicht immer leicht, genau die richtigen

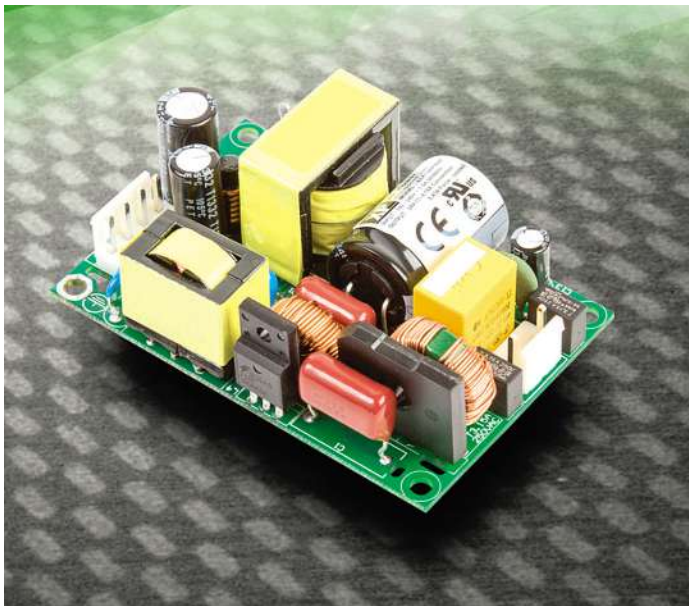


Stromspeicher für neu entwickelte Produkte zu finden. Schließlich geht es bei Batterien nicht nur um Leistung, sondern ebenso um Sicherheit, Langlebigkeit, Abmessungen, Kontaktierungen etc. Panasonic ist der weltweit größte Hersteller von Industriebatterien. Jetzt ist die komplett überarbeitete und neu gestaltete Version 3.0 erschienen – sowie eine für Computer oder Tablets optimierte Online-Applikation. Batterien lassen sich jetzt komfortabel anhand von beliebigen Parametern suchen. Die Smartphone App gibt es für Android und iOS (iPhone) Geräte und kann in den entsprechenden Stores kostenlos heruntergeladen werden.

PAISEU

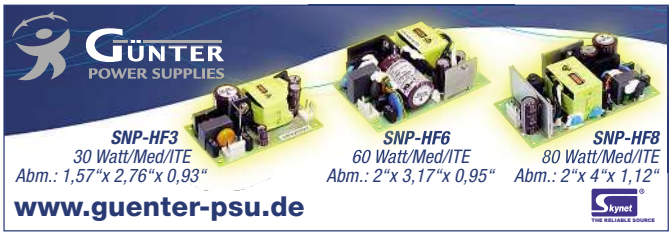
NETZTEILE

Hohe Leistung auf kleiner Grundfläche



Die hocheffizienten Miniaturnetzteile ECP130 von XP Power (Vertrieb MEV) haben Sicherheitszulassungen für Medizin- und IT- Anwendungen. Die Geräte liefern die volle Ausgangsleistung von 130 W mit nur 10 CFM forcierter Kühlung und noch 100 W bei Konvektionskühlung. Verfügbar sind sieben Versionen mit Singleausgangsspannungen von 12, 15, 18, 24, 28, 36 und 48 V_{DC}. Die Netzteile haben einen Eingangsspannungsbereich von 85 bis 264 V_{AC} und verfügen über Eingangssicherungen. Die Geräte der Netzteil-Serie haben sehr kompakte Maße von nur 50,8 mm x 76,2 mm mit einer Bauhöhe von 28 mm. Dadurch reduziert sich die benötigte Grundfläche gegenüber einem Standardgerät mit den Abmessungen von 2 Zoll x 4 Zoll um 25%. Die Leerlaufleistungsaufnahme beträgt <0,5 W und die Leistungsdichte 19,7 W/Zoll³ bei einem typischen Wirkungsgrad von 95%. Mit diesen Eigenschaften sind die Netzgeräte laut Herstellerangaben sowohl in Medizin- und IT-Applikationen und auch in allgemeinen Industrieanwendungen einsetzbar. Die Geräte sind nach der IT-Norm 60950-1 und der 3. Edition der IEC60601-1 sowie ANSI/AMMI ES60601-1 für Medizinanwendungen zertifiziert. Sie verfügen über niedrige Ableitströme und bieten zwei MOPP zwischen Eingang und Ausgang sowie einem MOOP zwischen Ausgang und Schutzleiter. Die Miniatur-Netzteile ECP130 arbeiten in einem weiten Temperaturbereich von –40 bis 70 °C, ohne Derating bis 50 °C, und erfüllen die Anforderungen der Grenzkurve B für leitungsgebundene und Grenzkurve A für abgestrahlte EMV nach EN55011 und EN55022. Die Geräte sind von MEV erhältlich. Neben der Design-In-orientierten Distribution bietet MEV auch Logistik-Konzepte und Dienstleistungen.

MEV



MEILENSTEINE DER ELEKTRONIK

11050

Begeben Sie sich auf Zeitreise!

In diesem Jahr feiert ELEKTRONIKPRAXIS 50. Geburtstag. Aus diesem Anlass berichten wir in jeder Heftausgabe bis Frühjahr 2017 und online auf der Meilensteine-Webseite über die führenden Unternehmen der Elektronikbranche. Was waren ihre wichtigsten Leistungen, wo stehen die Unternehmen heute und wie sehen die Pioniere der Elektronik die Zukunft?

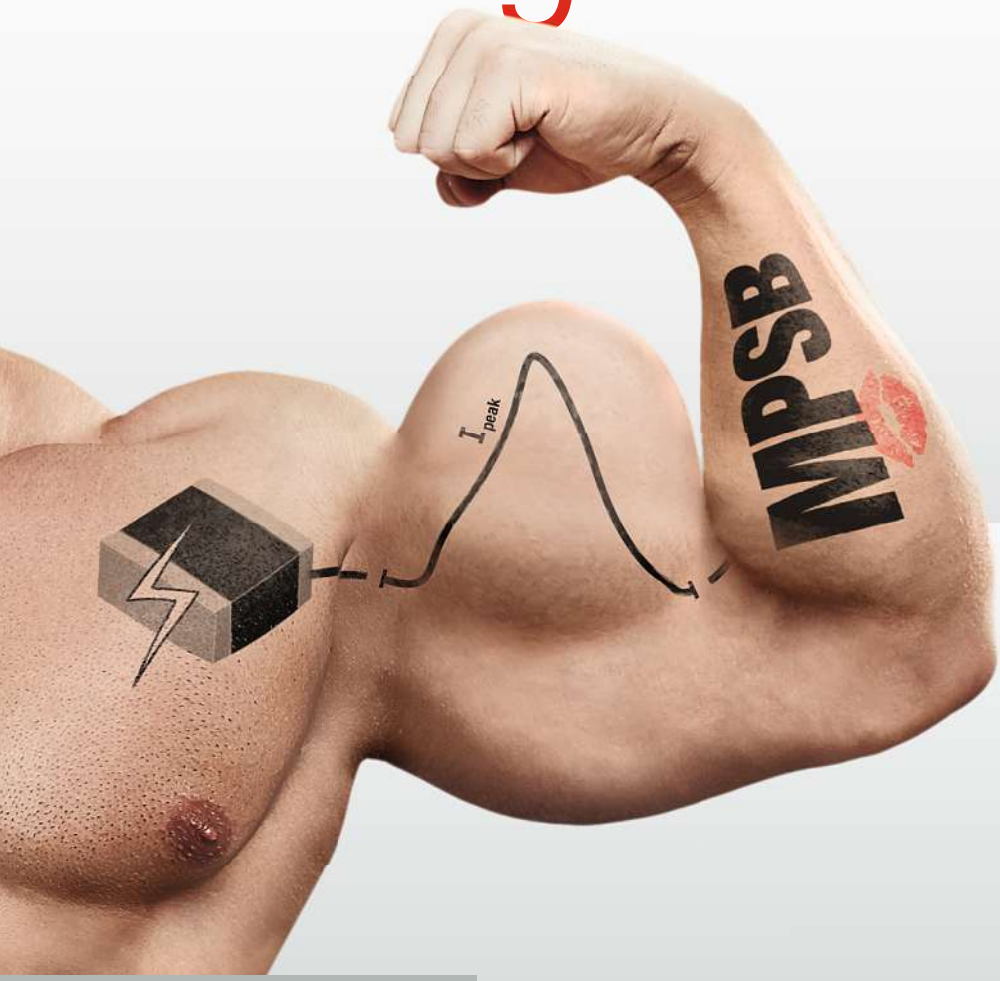
Entdecken Sie die ganze Geschichte unter **www.meilensteine-der-elektronik.de**

Analog	EDA	Elektronik-Händler	Distribution
ANALOG DEVICES AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™	cadence FlowCAD	CONRAD Business Supplies	EBV Elektronik An Avnet Company
RTOS & Tools	**Embedded**	**Messen & Veranstaltungen**	**Messen Steuern Regeln**
Green Hills SOFTWARE	kontron	Messe München	NATIONAL INSTRUMENTS
Relais	**Verbindungstechnik**	**Mikrocontroller**	**Schaltschränke/Klimatisierung**
Panasonic	PHOENIX CONTACT	RENESAS	RITTAL
HF-Messtechnik	**LED/Lighting**	**Displays**	**Stromversorgungen**
ROHDE&SCHWARZ	SEOUL	SHARP	TDK
Labormesstechnik	**Power Management**	**Passive Bauelemente**	**EMS**
TELEDYNE LECROY	Texas Instruments	WE WÜRTH ELEKTRONIK	zollner

Eine Serie von ELEKTRONIK PRAXIS

WÜRTH ELEKTRONIK

huge **peak**
strong **bead!**



#strongBEAD

WE speed up the future

electronica Halle B6 Stand 404

Die WE-MPSB ist die weltweit erste SMD-Ferritserie mit spezifizierter Spitzenstrombelastbarkeit. Sie verlängert die Lebenszeit Ihrer Anwendung. Der extrem niedrige R_{DC} ermöglicht höchste Nennströme bei gleichzeitig minimaler Eigenerwärmung. Die Serie ist optimiert für die Befilterung von hocheffizienten DC/DC-Konvertern im rauen Industrieumfeld. Weitere Informationen unter:
www.we-online.de/WE-MPSB

- Spezifizierte Spitzenstrombelastbarkeit
- Höchster Nennstrom
- Geringster R_{DC}
- Hohe Impedanz

Designen Sie ihren Spitzenstrom-belastbaren Filter in **REDEXPERT**, mit den weltweit ersten Spitzenstrom-spezifizierten SMD-Ferriten unter: **www.we-online.com/MPSB-designer**

Produktdarstellung in Originalgröße: