

VERGLEICH VON SI- UND SiC-HALBLEITERN

I. Koch

1 EINLEITUNG

Der Einsatz von Leistungselektronik in Anwendungsgebieten mit erhöhten Anforderungen (z. B. dem Automotive-Bereich) verlangt robuste und temperaturbeständige Komponenten. Hierbei geraten konventionelle Leistungshalbleiter aus Silizium (Si) mehr und mehr an die physikalischen Grenzen, da erhöhte Sperrschichttemperaturen das Verhalten der Halbleiter beeinflussen und zu drastisch erhöhten Verlusten bis hin zur Zerstörung der Bauteile führen können. Um auch bei höheren Temperaturen sichere und effiziente leistungselektronische Lösungen anbieten zu können, wird über den Einsatz von Halbleitermaterialien mit größerem Bandabstand wie Siliziumkarbid (SiC) diskutiert. SiC bietet ausgezeichnete Materialeigenschaften und ermöglicht Leistungshalbleiter mit sehr guten dynamischen Eigenschaften auch für höhere Sperrschichttemperaturen. Allerdings ist bei diesem neuen Halbleitermaterial die Realisierung der bei Si etablierten Halbleiterstrukturen nur bedingt möglich. Bipolare Leistungshalbleiter wie IGBTs und MOSFETs sind aufgrund von Problemen innerhalb der MOS-Struktur für Hochtemperaturanwendungen noch nicht serienreif und werden vielleicht langfristig zu einer Alternative. Momentan ist der *Junction Field Effect Transistor* (JFET) ein aussichtreicher Kandidat für Leistungshalbleiterschalter.

Um das Potential der SiC- mit der Si-Technologie für Anwendungen mit erhöhten Temperaturbereichen vergleichen und bewerten zu können, wurden im Rahmen des Förderprojektes InGA die derzeit neueste Si-IGBT- und Si-Dioden-Generation (Infineon) sowie die marktreifen SiC-JFETs und SiC-Schottky-Dioden (SICED) für den Einsatz in Wechselrichtern untersucht. Hierbei wurden typische Charakteristika wie Durchlass- und Schaltverhalten über verschiedenen Parametern wie der Sperrschichttemperatur aufgenommen. Der vorliegende Beitrag zeigt eine Auswahl an Messergebnissen der Untersuchungen.

2 UNTERSUCHUNGSPARAMETER / VERGLEICHBARKEIT

Um nicht nur für einzelne Arbeitspunkte Vergleichsaussagen zu erhalten, wurden für die Messungen Untersuchungsparameter festgelegt, die sowohl das Verhalten im gesamten Nennbereich, als auch das tendenzielle Verhalten in Grenzbereichen aufzeigen. **Tabelle 1** zeigt diese Parameter. Weiter sollten die Aussagen möglichst unabhängig vom Package und damit unabhängig von der Kühlung getroffen werden. Daher wurden die Versuche mit einem Doppelpulsversuch und nicht mit periodischen Einschaltimpulsen durchgeführt, so dass die bei den Schaltvorgängen erzeugte Verlustleistung kaum zur Erwärmung des Bauteils beitragen und die Gehäusetemperatur als Chiptemperatur angenommen werden kann. Die Erwärmung erfolgt über die Modulbodenplatte. Für die Messungen wurde eine niederinduktive und -kapazitive Kommutierungszelle verwendet. Die Halbleiter der beiden

Materialtechnologien unterscheiden sich nicht nur in den Halbleiterstrukturen, sondern auch in den Chipgrößen und den aktiven Flächen. Daher sind die Messergebnisse auf die aktive Fläche normiert, so dass ein Vergleich bei identischer Stromdichte, also bei gleicher Chipauslastung möglich wird.

Tabelle 1: Charakterisierungsgrößen

Charakterisierungsgrößen:	
- Junction-Temperatur	25°C...200°C
- Spannung	600V (400 V... 900 V)
- Strom	1 A... 15 A
- Gate-Widerstand	0 Ω... 82 Ω (IGBT4) ... 218 Ω (JFET)

Tabelle 2: Chipgrößen und aktive Flächen

[mm ²]	Chipgröße	Akt. Fläche (Flussrichtung)	Akt. Fläche (Sperrichtung)
IGBT4	13,49	6,93	
Emcon4 D	7,5	3,55	
JFET	5,38	3,95	5,23
SBD	7,51	5,818	6,81

Tabelle 2 zeigt neben der Chipgröße die aktiven Flächen der untersuchten Halbleiter. Die Unterscheidung in Sperr- und Flussrichtung bei SiC berücksichtigt den Randabschluss des Chips, der nur in Sperrichtung mit in die aktive Fläche eingeht. Für die Si-Chips kann nach Herstellerangabe gerade im hohen Temperaturbereich die Berücksichtigung des Randabschlusses vernachlässigt werden bzw. sind die genutzte Fläche und die aktive Fläche nahezu identisch. Für die Vergleiche wurde deshalb dieser Einfluss nicht weiter betrachtet.

3 DIODEN-MESSERGEBNISSE

Durchlassverhalten (Dioden):

Für die Messung der Durchlassspannung U_F wurden in die Bauelemente für eine Zeitdauer von ca. 50 μ s rechteckförmige Strompulse in Durchlassrichtung mit definierter Amplitude eingepreßt. Die daraus resultierenden Spannungsabfälle der Halbleiter sind unter Berücksichtigung der aktiven Fläche in **Bild 3** abgebildet.

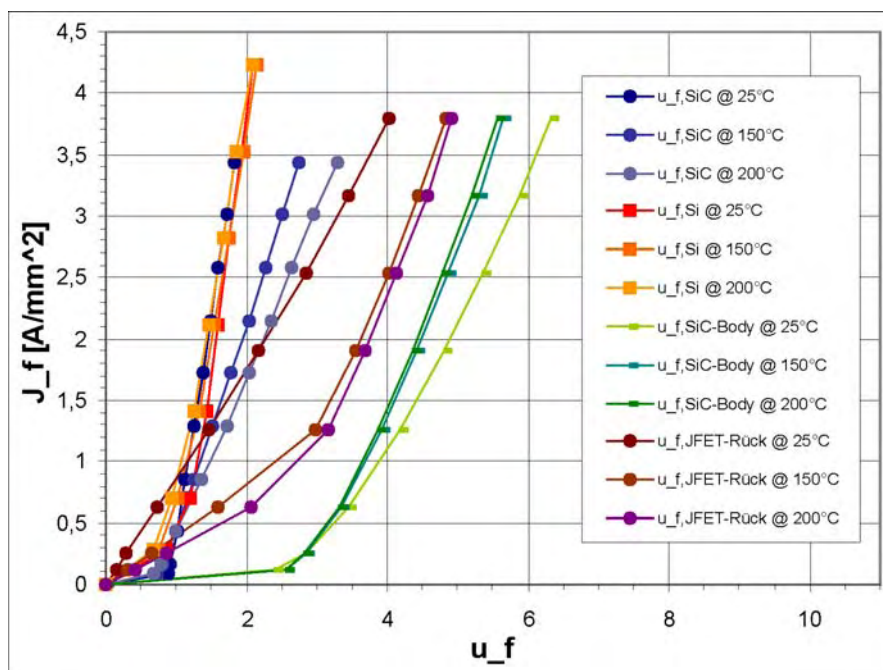


Bild 3: Durchlassspannungen der Dioden

Hieraus wird ersichtlich, dass das U_F der Si-Diode (orange) ein relativ temperaturunabhängiges Verhalten aufweist. Bei der SiC-Diode (blau) hingegen macht sich ein positiver Temperaturkoeffizient bemerkbar. Dieser führt bei höheren Temperaturen zu einer gegenüber Si erhöhten Durchlassspannung. Bei Einsatz eines JFETs als Halbleiterschalter kann in einem Wechselrichter auch auf den Einsatz einer zusätzlichen Freilaufdiode verzichtet werden, da strukturbedingt eine parasitäre interne (Body-) Diode vorhanden ist. Allerdings besitzt diese Diodenstruktur entgegen der Schottky-Struktur einen pn-Übergang der SiC-spezifisch eine Diffusionsspannung von ca. 2,7 V besitzt. Die hierzu gehörigen Kurvenverläufe (grün) weisen einen negativen Temperaturkoeffizienten auf, deren Durchlassspannungswerte auch bei höheren Temperaturen nicht in Bereiche der diskreten Dioden kommen. Eine geringfügige Verbesserung kann durch das Einschalten des auch rückwärtsleitfähigen JFETs erreicht werden. Dieser weist allerdings einen positiven Temperaturkoeffizienten auf, so dass bei höheren Temperaturen dessen linearer Verlauf (braun) kippt und beim Spannungsabfall die Parallelschaltung des pn-Überganges Einfluss (violett) nimmt. Bei beiden Varianten ist die Fläche des JFETs ohne Randabschluss aktiv.

Sperrverhalten (Dioden):

In **Bild 4** sind die Sperrströme der Si- und SiC-Dioden dargestellt. Hierbei liegen gerade im oberen Temperaturbereich die Sperrströme von Si weit oberhalb von SiC.

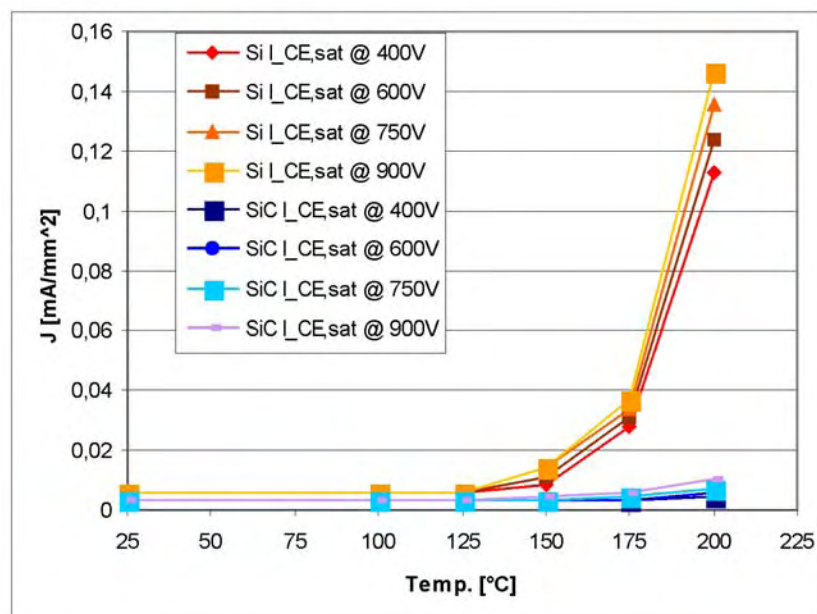


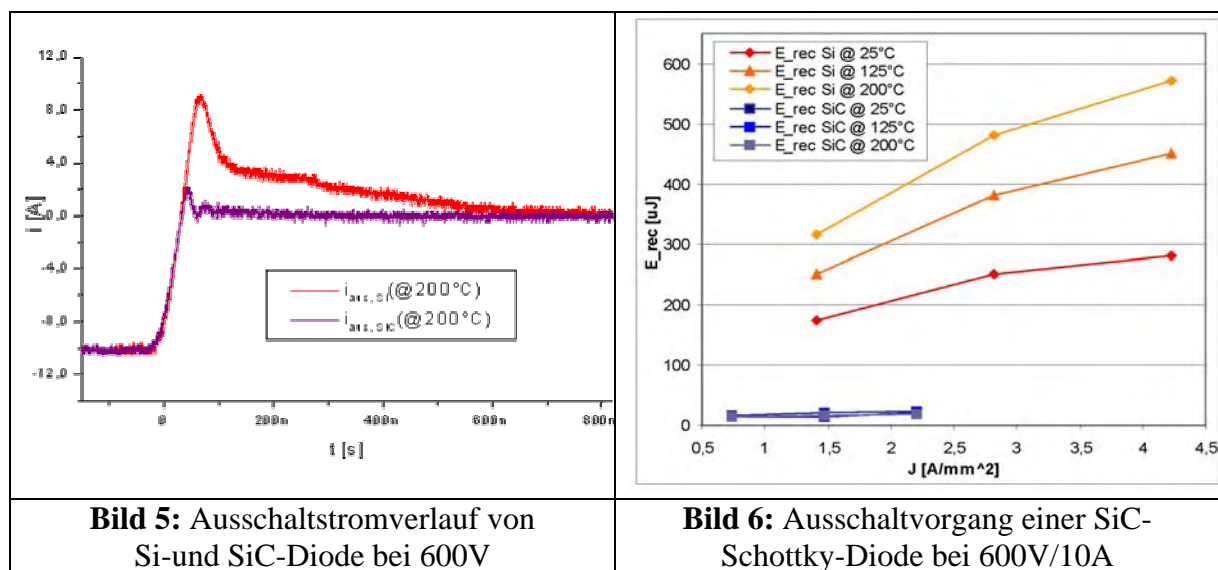
Bild 4: Sperrströme der Dioden

Grund ist der kleinere Bandabstand von Si, der bei höheren Temperaturen zu einer höheren Anzahl von freien Ladungsträgern und somit zu erhöhten Sperrverlusten führt. Eine Flächenvergrößerung durch Berücksichtigung des Randabschlusses würde die Sperrströme von Si nur wenig verringern. Das Sperrverhalten der Body-Diode entspricht dem des Schalters (vgl. Kapitel 4).

Schaltverhalten (Dioden):

Beim Schaltvorgang kommutiert der Strom von der Diode auf den zugehörigen Schalter bzw. umgekehrt. Hierbei treten aufgrund der nicht idealen Schaltflanken Verluste auf. Bei herkömmlichen Si-Dioden wurden diese Verluste maßgeblich durch den Rückwärtserholstrom beim Ausschalten bestimmt. Im Gegenzug sind die Einschaltverluste verschwindend gering und können vernachlässigt werden. Bei der SiC-Schottky-Diode ist dieser Umladestrom faktisch nicht vorhanden, wodurch sich die Schaltverluste drastisch reduzieren. Dieses ist im Schottky-Übergang begründet, der im Gegensatz zu der Si-Diode keine Speicherladung besitzt. Stromüberschwinger sind lediglich auf aufbaubedingte Kapazitäten zurückzuführen.

Bild 5 zeigt im Vergleich den Stromverlauf der Si- und SiC-Diode während des Ausschaltens. In **Bild 6** sind die Verlustkurven der beiden Halbleiter in Abhängigkeit von der Stromdichte für verschiedene Temperatur aufgetragen.



Stoßstromverhalten (Dioden):

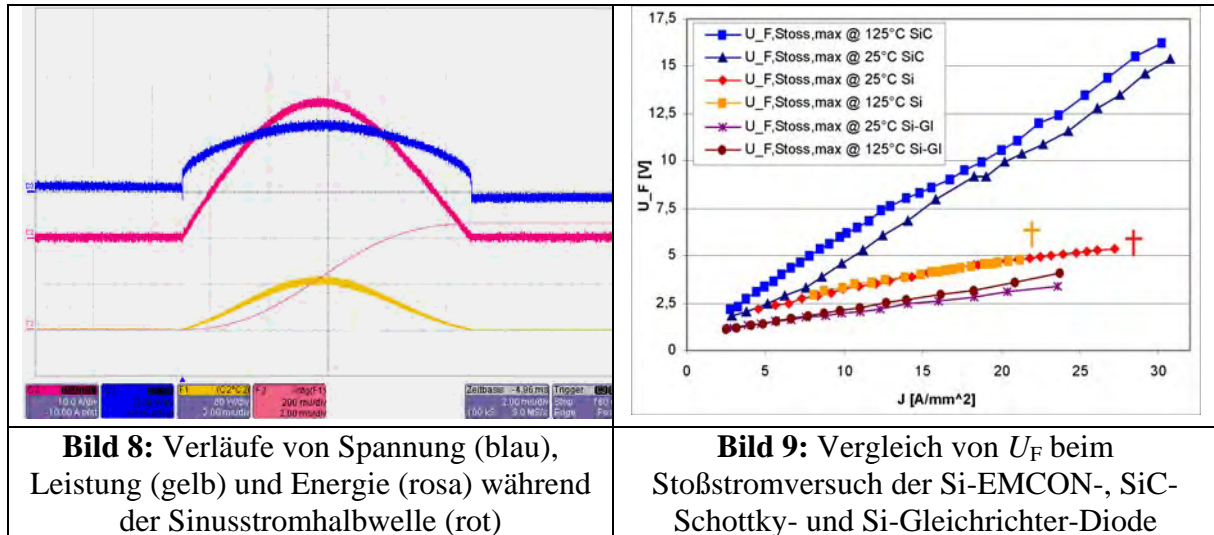
Um Aussagen über die Robustheit zu gewinnen, werden Dioden auf ihre Stoßstromfestigkeit untersucht. Hierfür wird eine sinusförmige Stoßstromhalbwelle für 10 ms in die zu testende Diode eingepreßt. **Bild 7** zeigt die dafür aufgebaute Versuchsschaltung.



Bild 7: Schaltung zur Erzeugung der Sinushalbwelle für Stoßstromversuche

Die Schwingung wird durch einen LC-Schwingkreis erzeugt, dessen Resonanzfrequenz auf 50 Hz abgestimmt ist und somit die geforderten 10 ms pro Halbwelle ermöglicht. Der Stromfluss kann aufgrund der Diodendurchlassrichtung nur in eine Richtung erfolgen, die negative Halbwelle wird unterdrückt. Mit dem Einschalten des IGBTs wird der Schwingkreis angeregt,

wobei der IGBT nach der Halbwelle wieder ausgeschaltet wird, um weitere positive Halbwellen zu unterdrücken. Im ausgeschalteten Zustand wird C über den Widerstand R_{Entl} entladen. **Bild 8** zeigt die gemessenen typischen Verläufe während einer Stossstromhalbwelle für eine Si-Diode.



In **Bild 9** ist zu erkennen, dass die Durchlassspannung U_F von der SiC-Diode (blau) auch bei höheren Stromdichten oberhalb der Si-Diode (rot) und der zum Vergleich herangezogenen Si-Gleichrichter-Diode (violett) liegt. Allerdings konnten trotz der höheren umgesetzten Verlustleistung mit der SiC-Diode wesentlich höhere Stromdichten erreicht werden. Bei der SiC-Diode konnte bis zu einer Stromdichte von ca. 30 A/mm^2 (ca. 180 A) sowohl bei 25°C als auch bei 125°C keine Schädigung festgestellt werden. Darüber hinaus wurden die Versuche aufbaubedingt nicht weitergeführt. Die Si-Diode hingegen wurde bereits ab einer Stromdichte von ca. 22 A/mm^2 (ca. 80 A) bei 125°C irreversibel geschädigt.

4 SCHALTER-MESSERGEBNISSE

Durchlassverhalten (Schalter):

Wie auch bei den Messungen an den Dioden wurden bei den Halbleiterschaltern die Durchlassspannungen bei einem rechteckigen Strompuls bestimmt. Bei dieser Vorgehensweise kann eine Erwärmung durch die Durchlassverluste weitestgehend vernachlässigt werden. In **Bild 10** sind die aufgenommenen Durchlassspannungen mit Bezug auf die aktive Fläche von IGBT und JFET dargestellt. Aus den Kurvenverläufen ist der lineare Anstieg beim JFET auf die Unipolarität zurückzuführen, wogegen der IGBT als Vertreter der bipolaren Halbleiter den auch für Dioden typischen exponentiellen Verlauf zeigt. Dadurch ergibt sich für den JFET eine niedrigere Durchlassspannung U_F bei geringen Stromdichten. Allerdings ist dieses Verhalten entgegen der IGBT-Charakteristik stark temperaturabhängig, so dass bei höheren Temperaturen deutlich erhöhte Durchlassspannungen auftreten.

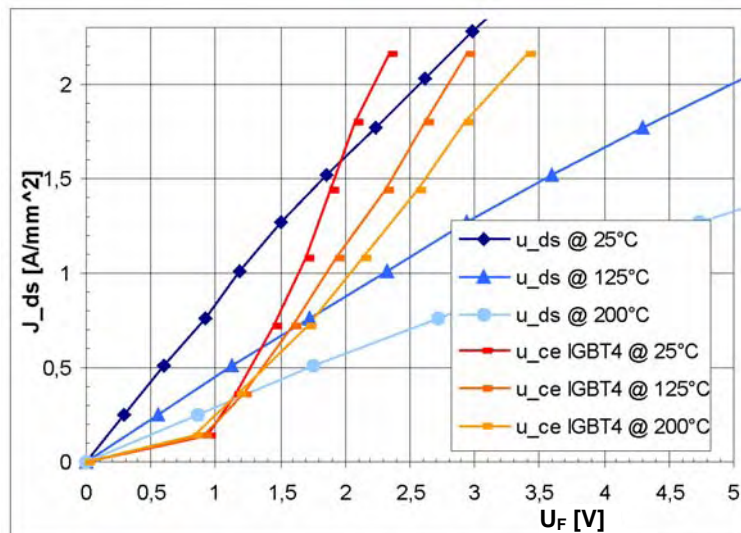


Bild 10: Vergleich der Durchlassspannung von Si-IGBT4 und SiC-JFET

Sperrverhalten (Schalter):

In **Bild 11** sind die Sperrkennlinien der beiden Halbleiterschalter dargestellt. Im Vergleich zu den sehr geringen und nahezu temperaturunabhängigen Sperrströmen des SiC-JFETs, weist der Si-IGBT ab 150°C sehr hohe Sperrströme auf.

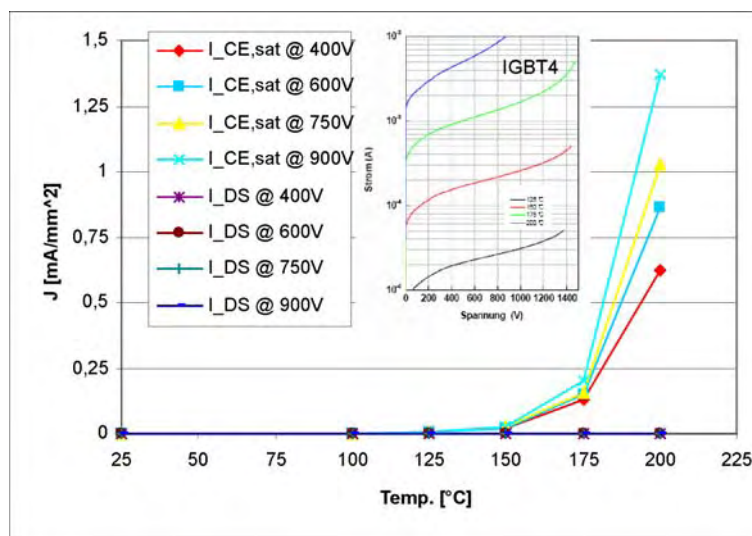


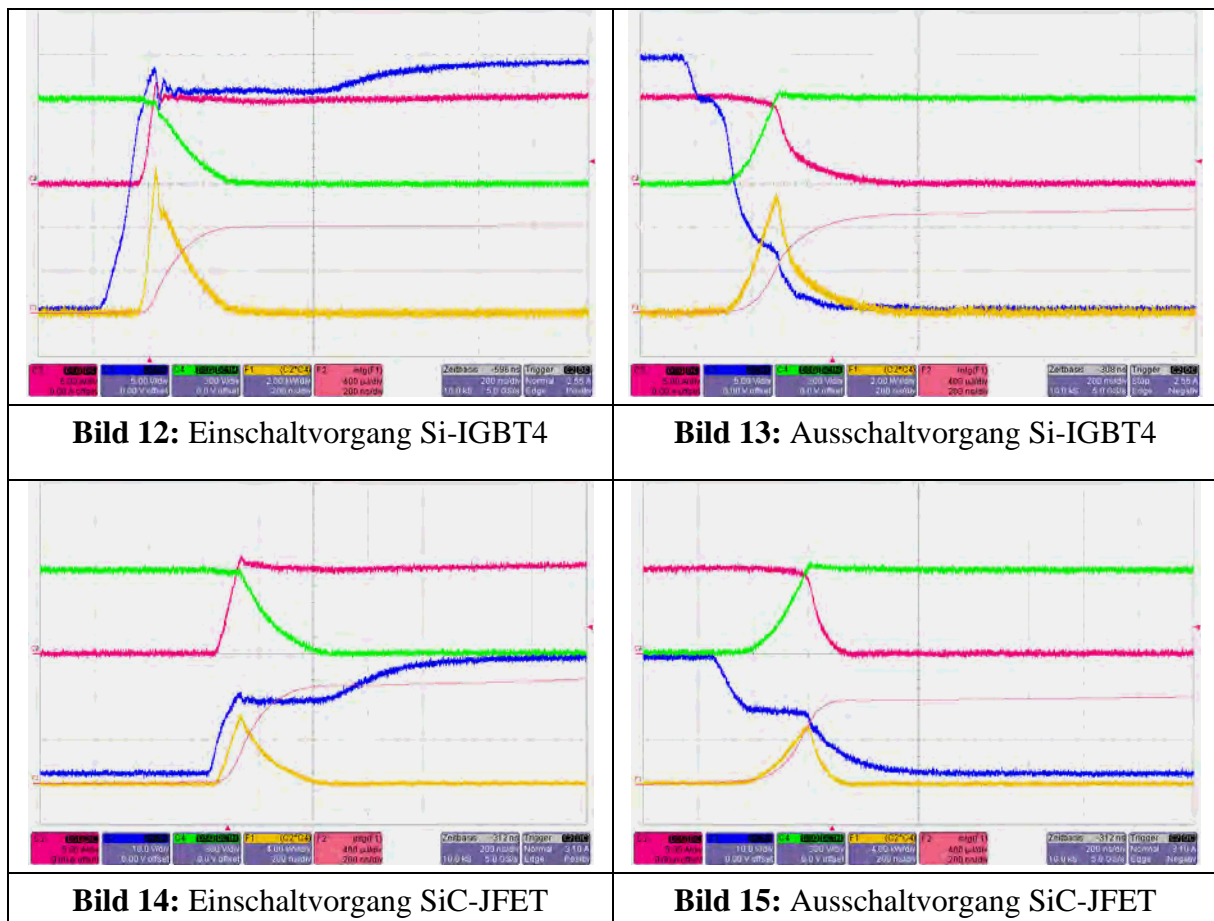
Bild 11: Vergleich der Sperrströme

Als Beispiel würde bei 175°C und 600 V mehr als 1 mA fließen, was zu Sperrverlusten von über 6 W führen würde. Diese Verluste sind in Hinblick auf einen Einsatz im Wechselrichter nicht gewünscht und würden einen erheblich größeren Kühlaufwand bedeuten.

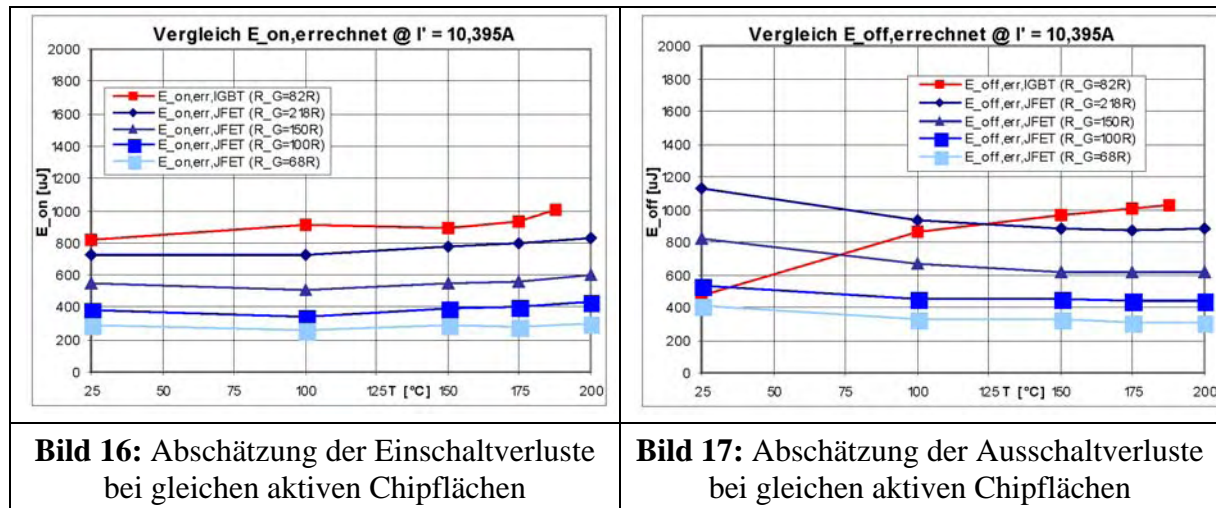
Schaltverhalten (Schalter):

Der Ein- und Ausschaltvorgang des IGBTs und des JFETs ist in den folgenden **Bildern 12 bis 15** abgebildet. Hierbei sind die Verläufe von Spannung (grün), Strom (rot), Gate-Spannung (blau), Leistung (gelb) und Schaltenergie (rosa) zu erkennen. Charakteristisch für den selbstleitenden JFET ist seine Ansteuerspannung, die zwischen 0 V (leitend) und -28 V (sperrend) geschaltet wird. Um auch bei den Schaltvorgängen die Vergleichbarkeit herstellen

zu können, sollten die Spannungs- (du/dt) und Stromsteilheiten (di/dt) möglichst identisch sein. Da allerdings über den Gate-Widerstand nur eine von beiden Flanken in Übereinstimmung gebracht werden kann, wird bei den folgenden Kurven der Gate-Widerstand des JFETs berücksichtigt. Der IGBT4 wurde mit seinem Nenn-Gate-Widerstand von 82Ω betrieben. Für ähnliche Flankensteilheiten sollte nach empirischer Ermittlung der Gate-Widerstand des JFETs zwischen 100Ω (ähnliches di/dt) und 218Ω (ähnliches du/dt) gewählt werden.

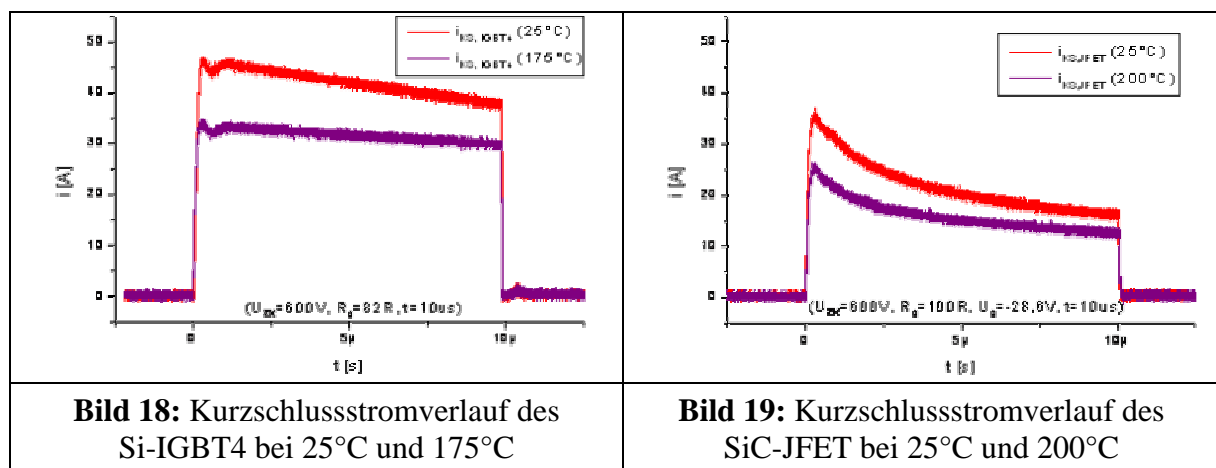


In weiteren Messungen konnte nachgewiesen werden, dass sich wie beim IGBT die Verluste des JFETs linear zur Spannung und zum Strom verhalten. Daher kann für den Schaltverlustvergleich die Schaltenergie des JFETs auch für eine dem IGBT entsprechende aktive Fläche mit gleicher Chipauslastung abgeschätzt werden. Bei einer typischen Stromdichte von $1,5 \text{ A/mm}^2$ ($10,395 \text{ A}$) ergeben sich damit die in **Bild 16** und **Bild 17** dargestellten Ein- und Ausschaltenergien. Hieraus ist abzuleiten, dass am JFET selbst bei einem Gate-Widerstand von 218Ω über den gesamten Messbereich geringere Einschaltverluste auftreten. Bei den Ausschaltverlusten hingegen ist die Einsparung der Ausschaltverluste von der Junction-Temperatur abhängig. Bei steigender Temperatur vergrößern sich die Verluste des IGBTs aufgrund eines vergrößerten Tail-Stroms und langsamerer Schaltflanken. Beim JFET hingegen steigt strukturbedingt die Schaltgeschwindigkeit, wodurch sich die Schaltverluste bei höheren Temperaturen verringern. Dadurch treten beim SiC-JFET gerade bei höheren Temperaturen ebenfalls geringere Ausschaltverluste gegenüber seinem Si-Pendant auf.



Kurzschlussverhalten (Schalter):

Um in einem Wechselrichter im Fehlerfall einen Kurzschlussstrom detektieren zu können, müssen die eingesetzten Halbleiterschalter für den Zeitraum der Fehlererkennung kurzschlussfest sein. In der Praxis wird hierfür eine Zeitdauer von 10 μ s gefordert. Die Kurzschlussstromverläufe beider Halbleiter bei 25°C und 175°C bzw. 200°C in **Bild 18** und **Bild 19** zeigen, dass der SiC-JFET ebenfalls für die geforderten 10 μ s kurzschlussfest ist.



5 ZUSAMMENFASSUNG

In den dargestellten Ergebnissen wurden typische Charakteristika wie Durchlass- und Schaltverhalten von Si- und SiC-Halbleitern insbesondere mit Berücksichtigung der Sperrschichttemperatur miteinander verglichen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten SiC-Halbleiter in Bezug auf Schalt-, Sperr- und Stoßstromverhalten gerade bei höheren Einsatztemperaturen vorteilhafte Eigenschaften besitzen. In Bezug auf Durchlass- und Ansteuerverhalten weist die konventionelle Si-Technologie jedoch derzeit günstigere Eigenschaften auf. Allerdings kann bei den Si-Bauteilen das kritische Sperrverhalten bei hohen Einsatztemperaturen erhebliche zusätzliche Verluste bewirken und sogar für manche Anwendungen zum Ausschlusskriterium werden.