Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 19

Artikel: Neue abschaltbare Leistungshalbleiter im 1000-V-Bereich

Autor: Krausse, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903724

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Neue abschaltbare Leistungshalbleiter im 1000-V-Bereich

J. Krausse

Durch die Nutzung moderner Halbleiter-Technik, wie sie bisher nur bei integrierten Schaltkreisen eingesetzt wurde, lässt sich eine neue Generation abschaltbarer Leistungshalbleiter entwickeln. Struktur und Funktionsweise des Leistungs-MOSFETs und der neuen Bauelemente SIRET und IGBT werden beschrieben und ihr Verhalten im Einsatz diskutiert und bewertet.

L'utilisation de la technique de semiconducteurs moderne telle qu'elle était antérieurement réservée aux seuls circuits intégrés, permet de développer une génération nouvelle de semiconducteurs de puissance destinés à la commutation. La structure et le mode de fonctionnement des transistors de puissance MOS à effet de champ et des nouveaux composants SIRET et IGBT sont d'abord décrits, puis leur comportement en exploitation est discuté et analysé.

Adresse des Autors:
Dr. *Jürgen Krausse*, Siemens AG, Bereich Halbleiter, D-8000 München 80.

Die konsequente Weiterentwicklung des bipolaren Leistungstransistors hat zu Produkten im 1000-V-Bereich geführt, die insbesondere dem Gebiet der drehzahlveränderbaren Antriebe neue Impulse verleihen. In der modernen Antriebstechnik werden heute fast ausschliesslich Leistungstransistormodule eingesetzt: Spannung 1000...1400 V, Stromklassen 5...400 A, Stromverstärkung 100...200 (Darlington-Konfiguration). Die Transistoren werden zusammen mit entsprechenden Inversdioden durch Hybrid-Montage in Modulgehäusen aufgebaut, geschaltet als Voll- oder Halbbrücke oder als Einzelschalter.

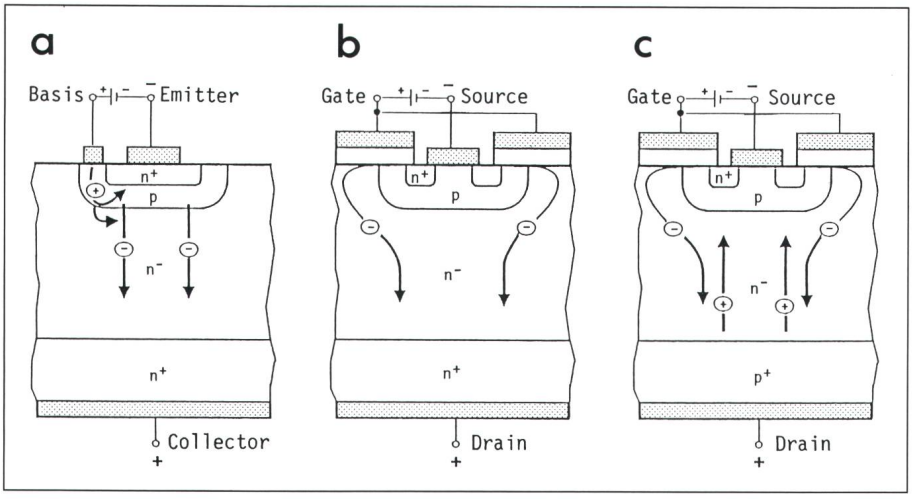
Heutige Leistungstransistoren sind für Schaltfrequenzen bis etwa 2 kHz gut geeignet. Die Entwicklung der Antriebstechnik verfolgt jedoch das Ziel, die Schaltfrequenz im Transistorumrichter auf mindestens 6...8 kHz, wenn möglich aber sogar über die Hörgrenze von 16 kHz zu erhöhen. Dies erfordert neue Technologiekonzepte für abschaltbare Leistungshalbleiter. Hier konnten in letzter Zeit deutliche Fortschritte erzielt werden, indem für die Herstellung der abschaltbaren Leistungshalbleiter moderne IC-Technik genutzt wird, wie sie bisher nur bei integrierten Schaltkreisen eingesetzt wurde.

Der Leistungs-Mosfet

Durch die Nutzung moderner Halbleiter-Technik, wie sie von Siemens im Rahmen des *Mega-Projektes* vorangetrieben wird, lässt sich eine neue Generation abschaltbarer Leistungshalbleiter entwickeln, die dem Anwender völlig neue Möglichkeiten und Konzepte der Gerätetechnik erlauben. Ein erstes Bauelement war Anfang der achtziger Jahre der Leistungs-Mosfet mit den herausragenden Eigenschaften:

- kapazitiver Steuereingang und damit einfache Ansteuerung
- extrem kurze Schaltzeiten und damit hohe Arbeitsfrequenz
- keine Speichereffekte
- kein second breakdown
- optimale thermische Stabilität.

Siemens bezeichnet seine Leistungs-Mosfets mit SIPMOS (*Si*emens *P*ower *MOS*). Das Typenspektrum ist auf Sperrspannungen von maximal 1000 V begrenzt. Der Grund ist, dass mit zunehmender Sperrspannung der Einschaltwiderstand $R_{DS(on)} = U_{DS}/I_D$ des MOS-Leistungstransistors stark ansteigt. Bei Sperrspannungen grösser als 1000 V wird der Einschaltwiderstand so gross, das ein Einsatz des Sipmos-Transistors wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll ist. Die Zunahme des Einschaltwiderstandes mit zunehmender Spannung ist physikalisch begründet und unabhängig von Art und Fabrikat des MOS-Leistungstransistors. Zur Erläuterung siehe Figur 1b: Dargestellt ist hier der Querschnitt durch eine Sipmos-Zelle, belastet mit positiver Drain-Spannung. Beim Anlegen einer positiven Gate-Spannung fliesst der Strom als reiner Elektronenstrom von n^+-Source oberflächennah durch den Kanal und danach sich ausbreitend vertikal nach unten zu Drain. Der Einschaltwiderstand, den der Elektronenstrom zu überwinden hat, wird wesentlich durch den spezifischen Widerstand der niederohmigen n^--Schicht bestimmt. Je höher der spezifische Widerstand, desto höher der Einschaltwiderstand des Bauelementes. Der spezifische Widerstand, der eingestellt werden muss, hängt wiederum von der geforderten Sperrspannung ab, die der Transistor am pn-Übergang aufnehmen muss: Je höher die Sperrspannung, desto höher der notwendige spezifische Widerstand und damit desto höher der Einschaltwider-



Figur 1 Querschnitte abschaltbarer Leistungshalbleiter

a konventioneller Bipolartransistor

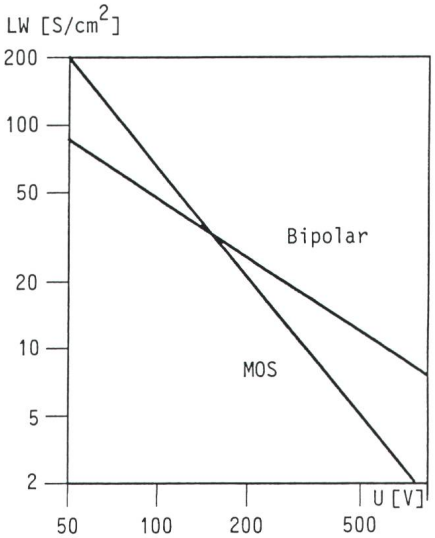
b Leistungs-Mosfet

c IGBT (*I*solated *G*ate *B*ipolar *T*ransistor)

stand $R_{DS(on)}$. Figur 2 stellt diese Abhängigkeit schematisch dar, wobei als Mass für die Stromtragfähigkeit LW der Kehrwert des Einschaltwiderstandes $1/R_{DS(on)} \cdot A$, bezogen auf die Chipfläche A, gewählt wurde.

Der Bipolartransistor

Andere Verhältnisse liegen beim bipolaren Leistungstransistor vor, dessen Querschnitt in Figur 1a skizziert ist. Durch das Anlegen einer positiven Basisspannung werden positive Defektelektronen vom Basiskontakt zum Emitter geführt. Diese Defektelektronen regen einerseits den n-Emitter zur Elektronenemission an und dienen andererseits auch dazu, die Leitfähigkeit des n^--Gebietes zu erhöhen. Da im Gegensatz zum Leistungs-Mosfet Ladungsträger beiderlei Vorzeichens beteiligt sind, spricht man von einem *bi*polaren Transistor. Bezüglich Stromtragfähigkeit unterscheiden sich die beiden Transistorkonzepte Bipolartransistor und Mosfet sehr (siehe Figur 2): Während bei niedriger Sperrspannung der Sipmos-Transistor dem Bipolartransistor grundsätzlich überlegen ist, vermag bei hohen Sperrspannungen der Bipolartransistor deutlich höheren Strom zu führen. In Figur 2 wird deutlich, warum bei Anwendungen, die hohe Spannungen von 1000 V und mehr erfordern (z.B. Antriebstechnik am 380-V-Netz), der Bipolartransistor heute eindeutig bevorzugt wird. Die folgenden Betrachtungen werden sich auf Bauelemente für diesen Spannungsbereich von etwa 1000 V beschränken.



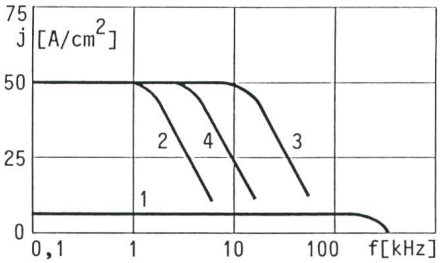
Figur 2 Stromtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Sperrspannung

U	Sperrspannung
LW	Leitwert pro Einheit der Chipfläche
MOS	Leistungs-Mosfet
Bipolar	Bipolartransistor

Nachteil eines heute üblichen Bipolartransistors ist sein Frequenzverhalten: Beim Ausschalten muss mit der Spannungsbelastung gewartet werden, bis die stromführenden Ladungsträger in Richtung Basiskontakt weggeräumt oder durch Rekombination verschwunden sind. Erst dann vermag der pn-Übergang Spannung aufzunehmen. Die erforderliche Zeit hängt sehr von den Abmessungen des Emitters ab. Bei den heute üblichen Bipolartransistoren ist der Emitter als tannenbaumähnliche Fingerstruktur ausgebildet, wobei die Breite eines Emitterfingers ungefähr 150 μ beträgt. Je schmaler der Finger, desto kürzer ist die Zeit des Ausräumvorganges unter dem Emitter, und desto schneller ist das Ausschaltverhalten des Bauelementes. Entlang der Leiterbahn des Emitterfingers fällt jedoch bei hohen Strömen eine nennenswerte Spannung ab. Dies ist ein Grund, warum ein Emitterfinger nicht beliebig schmal dimensioniert werden kann. Die tannenbaumähnliche Struktur des Emitters berücksichtigt den Spannungsabfall entlang der Emitterfinger und wirkt gleichzeitig als Emitterbalastwiderstand, der sich durch Wahl der Geometrie einstellen und optimieren lässt.

Das Frequenzverhalten ist in Figur 3 schematisch dargestellt. Aufgetragen ist hier die maximale Stromdichte j, die das Bauelement bei gegebenen thermischen Verhältnissen führen kann. Vergleicht man vorerst den Mosfet (1) mit dem Bipolartransistor (2), so stellt man fest: Bei niedrigen Taktfrequenzen vermag, wie oben beschrieben, der Bipolartransistor deutlich höheren Strom zu führen als der Leistungs-Mosfet. Steigert man die Taktfrequenz, so nehmen die Schaltverluste des Bipolartransistors ab etwa 1 kHz so stark zu, dass der Strom reduziert werden muss, um eine unzulässige Erhitzung zu vermeiden. Bei Frequenzen von deutlich mehr als 2 kHz ist der heute übliche Bipolartransistor nicht mehr geeignet.

Es wurde bereits erläutert, dass die Ausschaltzeit des Bipolartransistors verringert werden kann, indem die Emitterbreite reduziert wird. Eine



Figur 3 Maximale Stromdichte in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz

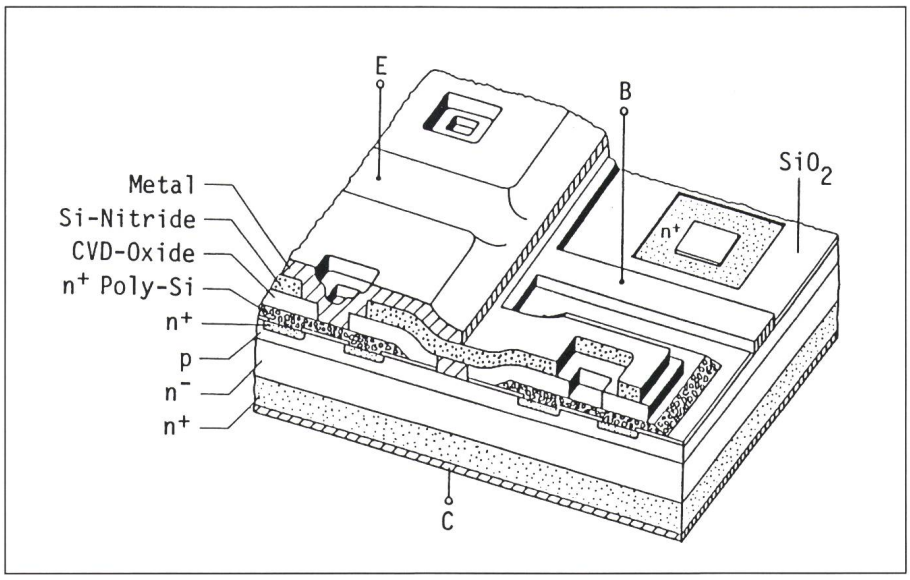
j	Stromdichte, Rechteckimpulsbetrieb mit Tastverhältnis 0,5
f	Frequenz
1	Leistungs-Mosfet
2	Bipolartransistor
3	Siret
4	IGBT

konsequente Weiterentwicklung in diese Richtung ist der SIRET (*Si*emens *R*ing *E*mitter *T*ransistor). Durch Nutzung moderner Halbleitertechnik war es möglich, einen Bipolartransistor mit einer grossen Zahl von quadratischen, extrem schmalen Emitterringen (5 µ) zu realisieren (siehe Figur 4). Das beim Sipmos-Transistor übliche n^+-Polysilizium bildet den Emitterballastwiderstand, der eine gleichmässige Stromverteilung über die Chipfläche gewährleistet. Wie sehr sich der extrem schmale Emitterring in dem Frequenzverhalten bemerkbar macht, zeigt die entsprechende Kurve (3) in Bild 3. Siret verhält sich in seinem Schaltverhalten fast wie ein Leistungs-Mosfet. Schaltfrequenzen grösser als 10 kHz sind beim Siret noch ohne weiteres möglich.

Die Siret-Struktur bringt, verglichen zum konventionellen Bipolartransistor, entscheidende Fortschritte:

- Die Flankenzeiten beim Ein- und Ausschalten sind mit jenen von Leistungs-Mosfets vergleichbar.
- Die Speicherzeiten liegen erheblich unter den bei konventionellen Bipolartransistoren üblichen Werten.
- Wegen des extrem schmalen Emitters kein second breakdown. Beim Einsatz des Siret-Transistors kann auf eine Schutzbeschaltung verzichtet werden.
- Beim Abschalten mit hohem Basisstrom entspricht der sichere Arbeitsbereich einem Rechteck über dem vollen Nennstrom. Beim konventionellen Bipolartransistor ist dagegen nur ein Bruchteil erlaubt.

Siret stellt die konsequente Weiterentwicklung des Biopolartransistor-Konzeptes dar, realisiert durch die heutigen Möglichkeiten moderner IC-Technik.



Figur 4 Querschnitt eines Siret

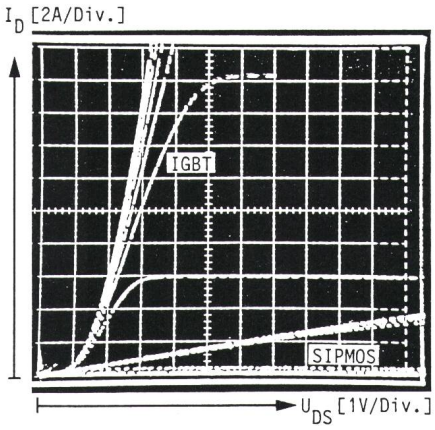
Siret *Si*emens *R*ing *E*mitter *T*ransistor
B Basis
C Kollektor
E Emitter

Der IGBT

Das Konzept des sogenannten IGBT ist die Weiterentwicklung des Leistungs-Mosfet mit dem Ziel, den Einschaltwiderstand zu verringern. IGBT steht für *I*solated *G*ate *B*ipolar *T*ransistor. Die Funktionsweise sei durch Vergleich der Querschnitte b und c in Figur 1 erläutert: Der Einschaltwiderstand des Mosfet wird dadurch bestimmt, dass die stromtragenden Elektronen das hochohmige n^--Gebiet durchfliessen müssen. Ersetzt man nun das n^+-Draingebiet durch ein p^+-Gebiet (siehe c in Figur 1), so regen die stromführenden Elektronen den p^+-Emitter zur Injektion von positiven Defektelektronen an. Die injizierten Defektelektronen fliessen senkrecht nach oben und verringern den Widerstand des n^--Gebietes in gewünschter Weise. Wichtig ist, durch entsprechende Designmassnahmen zu vermeiden, dass die nach oben fliessenden Defektelektronen den n^+-Emitter des Source-Gebietes zur Elektronenemission anregen. Eine Elektronenemission würde zu dem beim Thyristor bekannten Latch-up-Effekt führen, indem die npnp-Struktur ein rückgekoppeltes System zweier Transistoren bildet, das erst wieder abgeschaltet werden kann, wenn die anliegende Spannung zu Null wird. Die heute auf dem Markt erhältlichen Bauelemente beweisen, dass man gelernt hat, durch Designmassnahmen den Latch-up-Effekt zu vermeiden. Eine wirksame Massnahme ist, durch entsprechende Geometrie und Dotierung den Emitterwirkungsgrad und den Basisquerwiderstand des oberen npn-Transistors genügend klein zu halten.

In Bild 5 werden die Kennlinienfelder eines Sipmos-Transistors und eines IGBT verglichen. Beide Bauelemente haben gleiche Chipflächen und sind für eine Sperrspannung von 1000 V ausgelegt. Die erhebliche Reduzierung des Einschaltwiderstandes beim IGBT um einen Faktor von ungefähr 10 wird deutlich.

Nachteil des IGBT ist, dass das Frequenzverhalten deutlich gegenüber dem Mosfet verschlechtert ist. Die mit dem bipolaren Stromfluss gekoppelten Rekombinationseffekte verlangsamen das Schaltverhalten des IGBT und beschränken damit den Frequenzbereich (siehe Figur 3, Kurve 4).



Figur 5 Kennlinienfelder für Sipmos- und IGBT-Bauelement

U_{DS} Ausgangsspannung
I_D Ausgangsstrom
Feste Parameter: Sperrspannung U_{DSS} = 1000V
Chipfläche A = 42 mm²
Variabler Parameter: Gate-Spannung U_{GS}

Siret und IGBT im Vergleich

Bei einem Vergleich der beiden Konzepte Siret und IGBT fällt es schwer, einem der beiden Konzepte allein den Vorzug zu geben. Dies sei kurz anhand der Tabelle I erläutert, in der die Hauptmerkmale grob mit + (besser) und - (ungünstiger) gewertet sind:

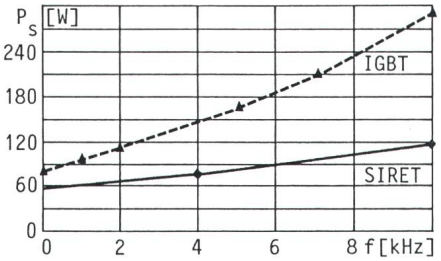
Frequenz/Verluste: Bezüglich Frequenzverhalten und Schaltverluste ist der Siret dem IGBT eindeutig überlegen. Dies wird in Figur 6 nochmals besonders deutlich, in der die gemessenen Gesamtverluste P_s (Summe von Durchlass- und Schaltverlusten) an Bauelementen beider Konzepte verglichen werden. Der Siret bietet hiernach recht leicht die Möglichkeit, bei Wechselrichterbetrieb die Arbeitsfrequenz auf weit über 10 kHz zu erhöhen.

Eigenschaft	Siret	IGBT
Frequenz	+	-
Schaltverluste	+	-
Spannung	-	+
Ansteuerung	-	+
Kurzschluss	-	+

Tabelle I Siret und IGBT im Vergleich

\+ besser

\- ungünstiger



Figur 6 Gesamtverluste P_s im Schaltbetrieb für Siret und IGBT

f Frequenz

P_S Summe von Durchlass- und Schaltverlusten

Kurven für 50A/1000V-Module, Wechselrichterbetrieb, Zwischenkreisspannung 600V, Strom 35A, Tastverhältnis 0,5

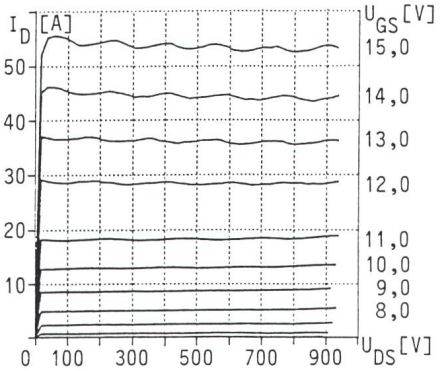
Spannung: Bei einem Bipolartransistor nimmt die Stromverstärkung mit wachsender Spannung ab. Diese physikalisch grundsätzliche Abhängigkeit begrenzt den Einsatz des Bipolartransistors auf Spannungen von maximal 1400 V. Hier sind dem IGBT keine prinzipiellen Grenzen gesetzt. Insbesondere nach dem bei Siemens entwickelten Konzept scheinen IGBTs in einem Spannungsbereich bis zu 1800 V und mehr realisierbar zu sein.

Ansteuerung: Der Stromsteuerung des Bipolartransistors steht die Spannungssteuerung des IGBT gegenüber. Die MOS-Ansteuerung bietet bei höheren Schaltleistungen die Möglichkeit einer einfacheren und billigeren Ansteuerung.

Kurzschluss: Das Kurzschlussverhalten des Transistors wird besonders in der Antriebstechnik als immer wichtiger gewertet. Bild 7 demonstriert eindrucksvoll, wie ideal sich ein IGBT im Kurzschlussfall verhält und einfache regelungstechnische Schutzmassnahmen ermöglicht.

Wertung der Konzepte

Die moderne Antriebstechnik verfolgt das Ziel, die Schaltfrequenz in den Transistorumrichtern auf mindestens 6...8 kHz zu erhöhen. Gründe sind Geräuscharmut, hohe Dynamik, geringe Maschinenverluste usw. Für diese Zielsetzung erscheint derzeit der IGBT-Modul bestens geeignet, wie die grosse Nachfrage nach diesen Bauelementen zeigt. Die in Tabelle I markierten Vorteile wie hohe Spannung, problemlose MOS-Ansteuerung und hervorragende Kurzschlussfestigkeit sind Eigenschaften, die den IGBT für die Antriebstechnik so interessant und zukunftsweisend machen. Entsprechend diesem Anwendungsfeld wird sich der IGBT vor allem als Modul durchsetzen, geschaltet als Voll- oder Halbbrücke oder als Einzelschalter. Der MOS-Eingang erfordert relativ geringen Ansteueraufwand. Die Integration von Schutz- und Steuerfunktionen in einem *intelligenten Modul* erscheint wirtschaftlich realisierbar.



Figur 7 Kennlinienfeld $I_D = f(U_{DS})$ eines IGBT von Siemens

U_{DS} Ausgangsspannung

I_D Ausgangsstrom

U_{GS} Gate-Spannung

Feste Parameter: Gehäusetemperatur 150 °C, Impulsbreite 10 µs, Chipfläche 42 mm²

Anders ist die Situation bei Anwendungen, die deutlich höhere Arbeitsfrequenzen erfordern wie z.B. bei Schaltnetzteilen, Schweissgeräten usw. Ähnlich wie der Sipmos-Transistor bietet der Siret hier mit seinem hervorragenden Schaltverhalten entscheidende Vorteile. Die Möglichkeit, auf Schutzbeschaltung zu verzichten, macht ihn besonders attraktiv im Vergleich zum heutigen Bipolartransistor. Siret ist jedoch heute noch kein ausentwickeltes Produkt. Die aufgezeigten Eigenschaften wirtschaftlich zu realisieren ist eine wesentliche Aufgabe der weiteren Entwicklung.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen AS 0003/0, AS 0004/1, AS 0025/9 und AS 0026/0 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.