

**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:** 85 (1994)

**Heft:** 15

**Artikel:** Spitzenforschung im Verbund Hochschule-Industrie : das Schwerpunktprogramm Lesit bringt Hochschule und Industrie näher zusammen : 2. Teil : Leistungselektronik

**Autor:** Steiner, Franz-Peter / Dettmer, Hartmut / Fichtner, Wolfgang

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902574>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

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

Die Leistungselektronik ist die Basis für die Steuerung und Umwandlung von elektrischer Energie und damit eine für unsere Gesellschaft sehr wichtige Ingenieurwissenschaft. Der enorme Fortschritt der Halbleitertechnologie führt zu neuen Bauelementen wie zum Beispiel Schaltern mit erweiterten Funktionen dank integrierter Intelligenz. Diese erfordern innovative Schalt- und Steuerkonzepte und ermöglichen neuartige Anwendungen in der Antriebstechnik oder der elektrischen Energieverteilung. Die im Rahmen des Schwerpunktprogramms LESIT (Leistungselektronik, Systemtechnik und Informationstechnologie) bearbeiteten Projekte umfassen sowohl neue Fabrikationstechnologien wie auch Design, Simulation und Implementierung neuer Komponenten, Schaltungen und Systeme. Auch die Sicherstellung der Zuverlässigkeit ist dabei ein wichtiger Aspekt der Entwicklungsarbeit und muss bereits in der Definitionsphase mitberücksichtigt werden.

# Spitzenforschung im Verbund Hochschule-Industrie

Das Schwerpunktprogramm Lesit bringt Hochschule und Industrie näher zusammen

## 2. Teil: Leistungselektronik

■ Franz-Peter Steiner, Hartmut Dettmer, Wolfgang Fichtner, Christian Schaal, Christian Gerster, Jörg Hugel, Thomas Eilinger, Adrian Omlin, Herbert Stemmler, Peter Jacob und Alessandro Birolini

stungselektronische Schaltungen) und 3 (leistungselektronische Systeme) sowie 9 (Zuverlässigkeit) behandelt.

### Spannungsgesteuerte Halbleiterschalter für hohe elektrische Leistungen

#### Klein, leistungsstark und einfach in der Anwendung

Motoren mit hoher elektrischer Leistung finden zum Beispiel als Bahnantriebe Verwendung. Für die Steuerung und Regelung derartiger Motoren werden Schalter benötigt, die diese Leistungen ein- und ausschalten können. Diese Schalter befinden sich notwendigerweise in den stromzuführenden Leitungen des Antriebes und müssen entsprechend geschützt und angesteuert werden. Der hierfür nötige Aufwand und die dabei anfallenden Kosten sind ausschlaggebend für die Wahl des Schalterkonzeptes [1]. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der im Schalter auftretende Leistungsverlust im eingeschalteten Zustand.

#### Adressen der Autoren und Kontaktadressen\*:

Dr. Franz-Peter Steiner\*, Lesit-Geschäftsführer, Labor für Physikalische Elektronik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich, Hartmut Dettmer und Prof. Dr. Wolfgang Fichtner\*, Institut für Integrierte Systeme, ETZ J 82, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Christian Schaal, Christian Gerster und Prof. Dr. Jörg Hugel\*, Professur für El.-techn. Entwicklungen und Konstruktionen, ETZ F 96, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Thomas Eilinger, Adrian Omlin und Prof. Dr. Herbert Stemmler\*, Professur für Leistungselektronik und Messtechnik, ETL H 24, ETH Zentrum, 8092 Zürich, sowie Peter Jacob und Prof. Dr. Alessandro Birolini\*, Professur für Zuverlässigkeitstechnik, ETZ H 84, ETH Zentrum, 8092 Zürich.

Im ersten Teil dieses Artikels wurde die Motivation und Organisation des Schwerpunktprogramms Lesit sowie das wissenschaftspolitische und industrielle Umfeld erläutert. In weiteren Teilen sollen Beispiele dieser erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule vorgestellt werden. Der vorliegende zweite Beitrag befasst sich dabei schweremittig mit der Leistungselektronik, sei es auf der Ebene der Halbleiter-Bauelemente, der Schaltungen oder ganzer Systeme. Diese Thematik wird in den Lesit-Modulen 1 (Leistungshalbleiter-Bauelemente), 2 (lei-



Je nach Anwendung muss auch noch die während des Schaltvorganges verbrauchte Leistung berücksichtigt werden. Ein idealer elektrischer Schalter lässt sich deshalb sehr einfach wie folgt spezifizieren:

- leistungslose Ansteuerung
- verlustlos im eingeschalteten Zustand (idealer Leiter, verschwindender Widerstand)
- verlustlos während des Schaltvorganges (keine Zeitverzögerung bei der Schaltung von Spannungen und Strömen).

### MOS-Transistor oder Bipolar-Schalter?

Im wesentlichen kann heute bei den Halbleiterschaltern zwischen MOS (Metal Oxide Semiconductor)-Transistoren und bipolaren Bauelementen unterschieden werden. Bei den *MOS-Transistoren* kann durch Anlegen einer Spannung an einen isolierten Gate-Anschluss ein elektrisch leitender Kanal zwischen den zwei Leistungsanschlüssen erzeugt und damit der Stromfluss zwischen diesen Anschlüssen ermöglicht oder unterbunden werden (Bild 1). Diese Transistoren sind also durch die Spannung am Gate-Anschluss gesteuerte Widerstände. Sie schalten sehr schnell, und durch den isolierten Gate-Anschluss kommen sie mit geringster Ansteuerleistung aus. Eine Anwendung für höhere Spannungen ist aber nicht möglich, weil dazu das

Leitbahngebiet, welches im Sperrfall die gesamte Spannung aufnehmen muss, sehr gross gemacht werden müsste. Mit der Länge dieses Gebietes steigen aber der Widerstand und damit die Verluste im leitenden Zustand zu stark an.

Bei den *bipolaren Schaltern* kommt für hohe Spannungen nur der Thyristor in Frage. Dieses Bauelement ist aus vier leitenden Schichten zusammengesetzt, welche ein System von zwei gekoppelten Bipolartransistoren, *B1* und *B2*, bilden (Bild 2). Wird dem Gate-Anschluss ein Strom zugeführt, so findet eine positive Rückkopplung zwischen diesen beiden Transistoren statt. Diese Rückkopplung ergibt einen sehr niedrigen Widerstand im leitenden Zustand, selbst dann noch, wenn das Leitbahngebiet für die Aufnahme hoher Spannungen sehr gross ausgelegt wird. Über den Gate-Anschluss kann aber auch ein Strom aus dem Thyristor herausgezogen und damit die positive Rückkopplung wieder unterbrochen werden, was zum Abschalten des Thyristors führt. Diese sogenannten *GTOs* (Gate Turn-off Thyristor) können somit an hohen Spannungen grosse elektrische Leistungen schalten und haben niedrige Leitungsverluste. Ein wesentlicher Nachteil der *GTOs* liegt jedoch darin, dass zum sicheren Ausschalten dieser Bauelemente bis zu 30% des zu unterbrechenden Stromes aus dem Gate-Anschluss abge-

führt werden muss. Aus diesem Grunde ist die Ansteuerung von *GTOs* aufwendig und teuer.

### MCT – ein kombinierter Bipolar-MOS-Schalter

Ein Bauelement, welches die Vorteile der *GTOs* (hohe Stromtragfähigkeit bei niedrigen Leitungsverlusten) mit der nahezu leistungslosen Ansteuerung der *MOS-Transistoren* in sich vereint, ist der *MCT* (MOS Controlled Thyristor) [2]. Der *MCT* besteht wie der *GTO* aus einer Vierschichtstruktur, welche die zwei gekoppelten Bipolartransistoren bildet. An der Oberfläche werden *MOS-Transistoren* integriert, über deren Gate-Anschluss der *MCT* mit einem Spannungssignal ein- und ausgeschaltet werden kann (Bild 3). Zum Einschalten des Thyristors wird der *MOS-Transistor M1* durch Anlegen einer positiven Spannung an den Gate-Anschluss leitend gemacht. Dadurch kann Strom von der Kathode durch den *MOS-Transistor* in den Bipolartransistor *B1* fließen, so dass dieser leitend wird. Dadurch stellt sich eine positive Rückkopplung zwischen den Bipolartransistoren ein.

Um den Schalter zu unterbrechen, wird eine negative Spannung an den Gate-Anschluss angelegt, was bewirkt, dass der *MOS-Transistor M2* leitend und *M1* gesperrt wird. Der Strom fließt jetzt durch den *MOS-Transistor M2* zur Kathode und schliesst damit den Bipolartransistor *B2* kurz. Dies unterbricht die Rückkopplung zwischen den Bipolartransistoren und schaltet den Thyristor aus.

Die Bipolar-Technologie, wie sie zum Beispiel für *GTOs* verwendet wird, ist charakterisiert durch relativ grobe Strukturen und tief diffundierte Schichten. Die *MOS-Technologie* andererseits macht Gebrauch von extrem feinen Strukturen, wie sie sonst in höchstintegrierten digitalen ICs zu finden sind. Die Vereinigung dieser Technologien zur sogenannten *BiMOS-Technologie* ist sehr komplex und erfordert optimale Herstellungsbedingungen, wie sie nur in den von der Halbleiterindustrie her bekannten modernen Reinräumen geschaffen werden können.

### MCTs für hohe Spannungen

Weltweit sind *MCTs* bisher nur als Labormuster für relativ niedrige Spannungen hergestellt worden. Nur ein einziger Hersteller in den USA [3] bietet *MCTs* kommerziell an, und dies lediglich für Spannungen bis 1400 V.

Das Potential derartiger Bauelemente ist jedoch weit grösser: Dank seiner niedrigen Leistungsverluste selbst bei einer Auslegung für hohe Spannungen könnten die *MOS-Controlled Thyristors* die *GTOs*, wie sie zum Beispiel in Bahnantrieben Verwen-

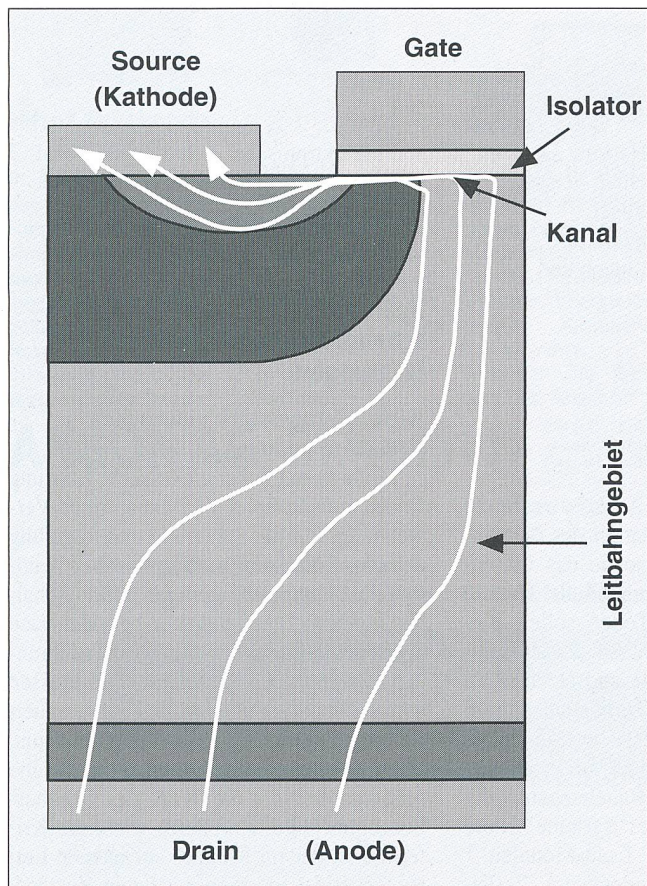


Bild 1 Struktur eines Leistungs-MOS-Transistors

Die weissen Pfeile zeigen den Stromfluss bei eingeschaltetem Transistor. Der gesamte Strom fließt in einem Kanal unter dem isolierten Gate.



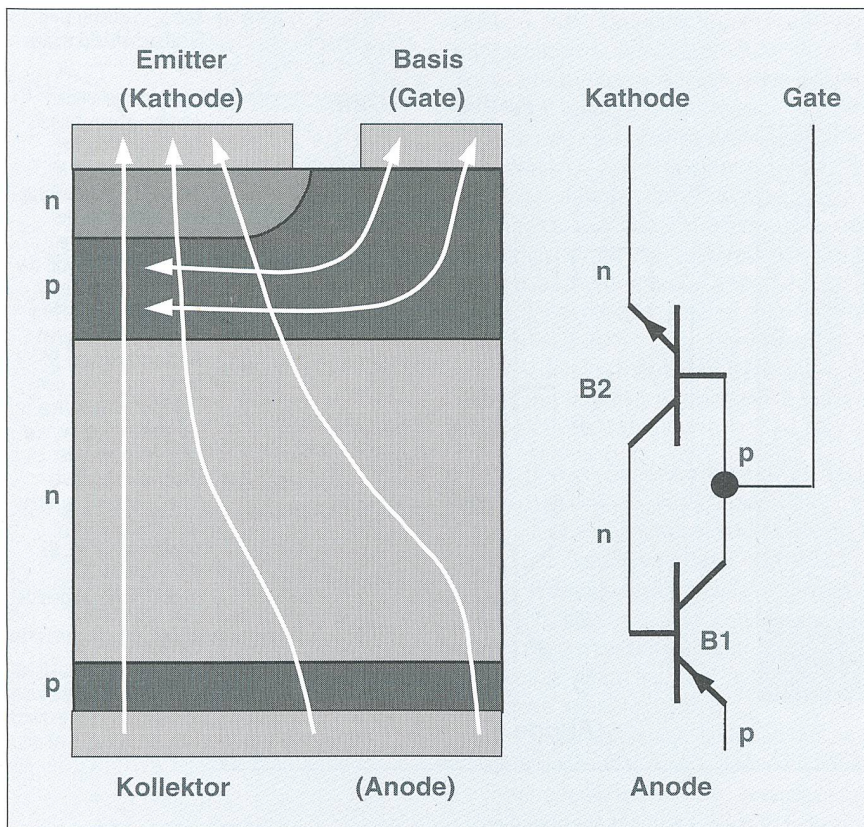


Bild 2 Struktur und Ersatzschaltbild eines GTO

Die weissen Pfeile von der Anode zur Kathode zeigen den Stromfluss im eingeschalteten Zustand. Die weissen Pfeile, die mit dem Gate-Kontakt verbunden sind, zeigen, dass der Strom im Gate-Kontakt in beide Richtungen fließen kann. Wird dem Gate Strom zugeführt, so schaltet der Thyristor ein; wird die Stromrichtung umgedreht, so schaltet der Thyristor aus.

ding finden, verdrängen. In dieser Leistungsklasse, wo der Aufwand für die Ansteuerung und den Schutz der GTOs sehr hoch ist, kommt der Vorteil der spannungsgesteuerten MCTs voll zum Tragen. Am Institut für Integrierte Systeme (IIS) der ETH Zürich wurden deshalb, in Zusammenarbeit mit der ABB Semiconductor AG in Lenzburg, MCTs mit einer maximalen Sperrspannung von 5000 V für Schaltanwendungen bis 4000 V entwickelt. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf minimale Leitungs- und Schaltverluste dieser Bauelemente gerichtet.

Der Entwurf und die Optimierung derart komplexer Bauelemente kann nur noch auf dem Computer mit Simulationswerkzeugen, sogenannten TCAD (Technology Computer Aided Design)-Tools durchgeführt werden. Simulationen haben im Vergleich zum Experiment zudem zwei wesentliche Vorteile: Die Kosten sind um mindestens eine Größenordnung geringer, und der Zeitaufwand beträgt Stunden bis Tage und nicht Wochen bis Monate.

Diese TCAD-Tools wurden am IIS in Zusammenarbeit mit der ISE Integrated Systems Engineering AG, einer Spin-off-Firma der ETH Zürich, entwickelt. Sie ermöglichen die Simulation von Halbleiter-

Bauelementen in 1, 2 und 3 Dimensionen unter statischen und transienten Bedingungen. Als erstes wird dabei der gesamte Herstellungsprozess, also zum Beispiel das Einbringen und Diffundieren der Dotierstoffatome zur Erzeugung der verschiedenen leitenden Schichten, das Aufbringen des Isolators und des Gate-Kontaktes usw., simuliert. Anschliessend wird das physikalische Verhalten des auf diese Weise erzeugten virtuellen Bauelements in Abhängigkeit von äusseren Bedingungen (z. B. die das Bauelement umgebende Schaltung, Ströme, Spannungen, Temperatur usw.) simuliert. Ausser den elektrischen Ergebnissen, also den Strömen und Spannungen an den Anschlüssen des Bauelementes, liefert die Simulation aber auch noch Grössen, die einer Messung nicht zugänglich sind. So ist es möglich, beispielsweise die Ladungsträgerverteilung, Stromdichten und den Verlauf des elektrischen Feldes, welche während eines Schaltvorganges in einem Bauelement auftreten, zu berechnen. Daraus können ein tieferes Verständnis der zugrundeliegenden Physik gewonnen und gezielte Modifikationen zur Optimierung der Bauelemente vorgenommen werden.

Ein Beispiel für die Stromdichteverteilung im leitenden Zustand und während des

Ausschaltens in einem zweidimensionalen Schnitt durch eine MCT-Zelle ist in Bild 4 gezeigt. Im Vergleich zu Bild 3 ist deutlich zu erkennen, wie der Strom im leitenden Zustand durch den Kathoden-Emitter, also den Bipolartransistor B2, fliesst. Während des Ausschaltens jedoch ist der Stromfluss vollständig unter dem Gate des MOS-Transistors M2 konzentriert, so dass B2 kurzgeschlossen wird.

### Vielversprechende Labormuster von MCTs für Anwendungen bis 4000 V

Nachdem die Herstellungsprozesse und die geometrischen Abmessungen der MCTs auf diese Weise festgelegt waren, erfolgte die Herstellung im Mikrolabor der ABB in Baden-Dättwil. Die Charakterisierung wurde auf einem eigens angefertigten Prüfstand für Messungen bis 50 A und 5000 V unter realistischen Schaltungsbedingungen, also induktiver Last, wie sie bei Motorsteuerungen immer vorliegt, durchgeführt. Die MCTs aus diesem Forschungsprojekt weisen sehr geringe Leitungsverluste, vergleichbar denen heutiger GTOs, auf. Sie können ohne jegliche Schutzbeschaltung an einer Spannung von 4000 V eine Stromdichte von bis zu 50 A pro Quadratcentimeter Chip-Fläche durch einfaches Wechseln der Gate-Spannung von +15 V auf -15 V zuverlässig abschalten (Bild 5) [4]. Die Ergebnisse dieser Labormuster sind äusserst vielversprechend und zeigen die zukünftige Entwicklung in der Steuerung von grossen elektrischen Antrieben auf.

### Wirtschaftliche Relevanz

Die technischen Vorteile von modernen Leistungsbaulementen führen auch zu einer wesentlichen Reduktion der Kosten. Die externe Beschaltung für die Ansteuerung und den Schutz des Bauelementes, die den Anwender wesentlich teurer zu stehen kommt als das eigentliche Bauelement, kann drastisch reduziert werden. Dies bedeutet neben den geringeren Kosten auch eine wesentliche Reduktion des Platzbedarfes. Moderne Leistungsbaulemente weisen auch geringere elektrische Verluste auf und helfen damit Energie einzusparen.

### Leistungselektronische Schaltungstechnik

Unter der Leitung von Prof. Hugel werden an der Professur für Elektrotechnische Entwicklungen und Konstruktionen (EEK) der ETH Zürich in insgesamt acht Lesit-Projekten neuartige leistungselektronische Schaltungs- und Steuerkonzepte entwickelt und untersucht. Dabei stehen neben Anwendungen im Bereich Magnetlagertechnik (Projektpartner: Mecos Traxler AG)



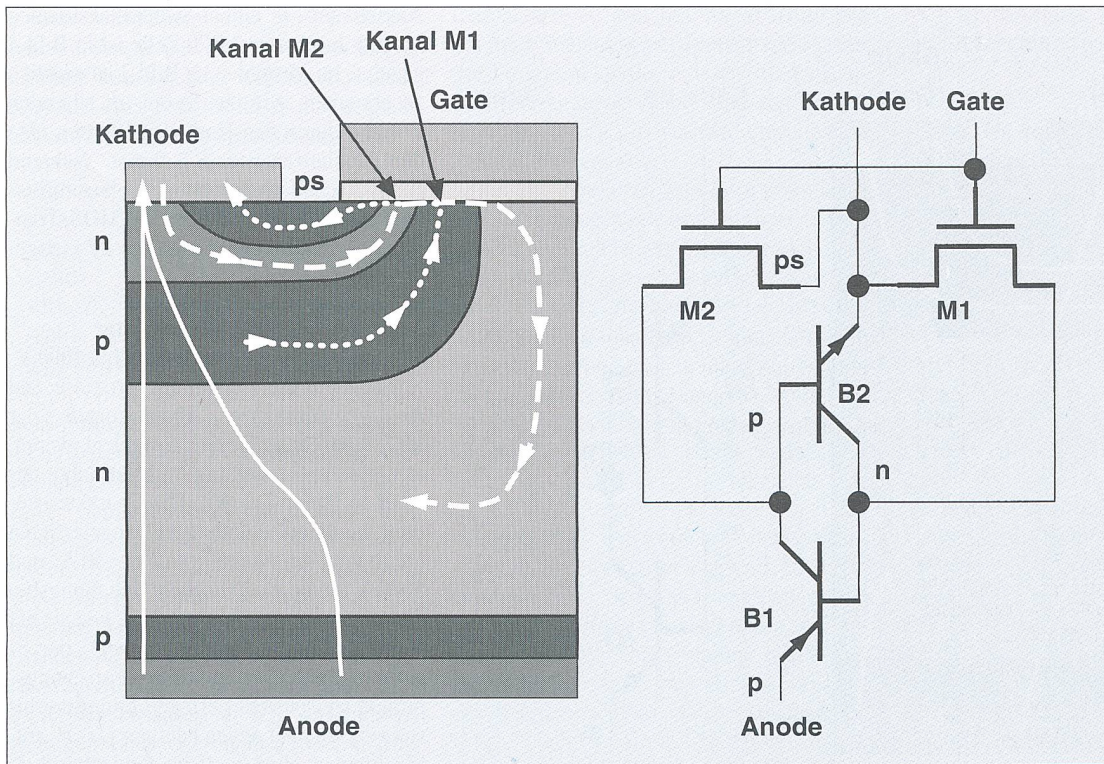


Bild 3 Struktur und Ersatzschaltbild eines MCT

Die durchgehenden weissen Linien zeigen den Stromfluss bei eingeschaltetem MCT. Die gestrichelte weisse Linie zeigt, wie der Strom bei positiver Gate-Spannung von der Kathode durch den MOS-Transistor M1 in die Basis des unteren Bipolartransistors B1 fließt und damit den Thyristor einschaltet. Die gepunktete weisse Linie zeigt, wie der Strom bei negativer Gate-Spannung aus der Basis des oberen Bipolartransistors B2 durch den MOS-Transistor M2 abgeleitet wird und so die Thyristorfunktion unterbricht.

vor allem neue Konzepte für die Leistungssteigerung und die Erhöhung der Einsatzflexibilität moderner Stromrichter (Projektpartner: ABB Industrie, ABB Verkehrssysteme und Schindler Aufzüge AG) im Vordergrund.

tern für zukünftige Stromrichter mit Taktfrequenzen von mehreren kHz. Dafür besteht dringender Bedarf in verschiedenen

Anwendungen in Form von Mittelspannungsumrichtern. Es sei in diesem Zusammenhang nur auf die Eisenbahntraktion mit

**Hochleistungs-Halbleiterschalter mit reihengeschalteten IGBT**

Zur Erhöhung der schaltbaren Spannung können schnelle Halbleiterschalter (wie der Insulated Gate Bipolar Transistor IGBT) in Reihe geschaltet werden, wobei sich allerdings bei den transienten Schaltvorgängen (Ein- und Ausschalten) und im stationär gesperrten Zustand (ausgeschaltet) die gesamte Spannungsbeanspruchung auf die einzelnen Halbleiter aufgrund von natürlichen Parameter-Unterschieden ungleichmässig verteilt. Dies kann zur Überbeanspruchung einzelner Halbleiter führen. Bisherige Lösungen verlangsamten den Schaltvorgang oder gleichen nur einen Teil der Parameter-Unterschiede aus, so dass wegen der Unvollständigkeit der Korrektur und aufgrund von Parameter-Änderungen (Drift) die Ausnutzung der Halbleiter gering bleibt oder aber die Eigenschaften schneller Halbleiterschalter verändert werden.

Das neue, zusammen mit dem Industriepartner ABB patentierte Verfahren der «Ausgleichsregelung für reihengeschaltete Halbleiterschalter» wurde im Rahmen eines Lesit-Projekts der EEK im März 1993 erfolgreich verifiziert. Es verspricht neue Möglichkeiten für die Realisierung von schnellen Hochspannungs-Halbleiterschaltern

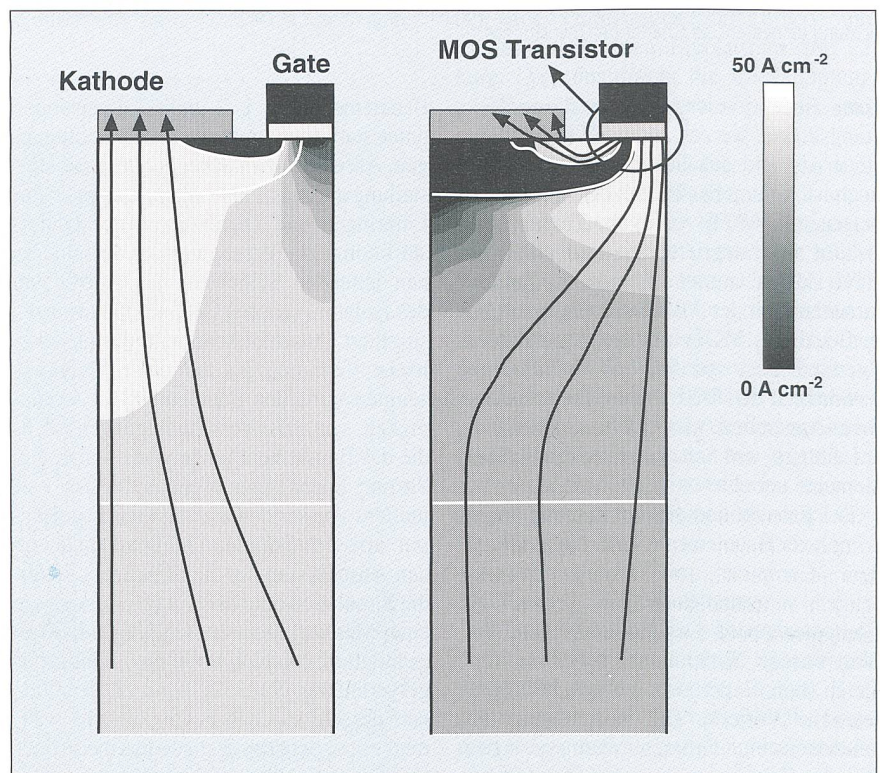


Bild 4 Stromdichteverteilung in einer MCT-Zelle

Die Pfeile zeigen die Stromflussrichtung. Auf der linken Seite ist die Stromdichteverteilung im eingeschalteten Zustand gezeigt. Der Strom fließt durch den Kathoden-Emitter ab, der MCT ist im Thyristormodus. Auf der rechten Seite ist die Stromdichteverteilung während des Ausschaltvorganges gezeigt. Durch Anlegen einer positiven Spannung an das Gate des MOS-Transistors wird der gesamte Stromfluss durch den MOS-Transistor umgeleitet. Der Thyristormodus des MCT ist dadurch unterbrochen. In diesen Bildern ist nur ein Ausschnitt der ganzen MCT-Zelle gezeigt.



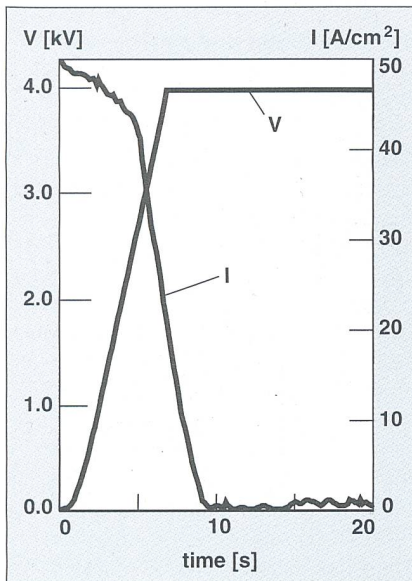


Bild 5 Gemessener Strom- und Spannungsverlauf während des Ausschaltvorganges eines MCT

Das Bauelement kann  $50 \text{ A/cm}^2$  an einer Netzspannung von 4000 V abschalten. Um den Ausschaltvorgang einzuleiten, ist lediglich die Änderung der Spannung am isolierten Gate-Anschluss von +15 V auf -15 V erforderlich.

Fahrdrachtspannungen von 15 kV und gelegentlich auch 25 kV hingewiesen. Auf einem bei der EEK aufgebauten Prüfstand mit wassergekühltem Umrichter-Brücken-zweig für 3,5 kV Zwischenkreisspannung und 300 A Phasenstrom (Bild 6) wird das Verfahren momentan im höheren Leistungsbereich erprobt.

Mit dem neuen Verfahren wird eine transient und stationär gleichmässige Spannungsverteilung und damit höchstmögliche Ausnutzung der Leistungs-Halbleiter erreicht. Dabei werden lediglich die Ein- und Ausschaltzeitpunkte sowie die Ausschalt-Steuerspannungen der einzelnen Schalter durch eine Ausgleichsregelung geringfügig gegeneinander verschoben, so dass Parameter-Unterschiede und -änderungen der signal- und leistungselektronischen Schaltungsteile ohne Erhöhung der Schaltverluste und ohne zusätzliche Lastkreis-Beschaltungen selbsttätig ausgeglichen werden.

Somit können mit geringen Zusatzkosten moderne schnelle Leistungshalbleiter wie IGBTs in beliebiger Zahl in Reihe geschaltet und hoch ausgenutzt werden. Dies ermöglicht neue Anwendungsgebiete wie transformatorlose Traktionsantriebe, Hilfsbetriebs-Wechselrichter in Bahnanwendungen, Mittelspannungsumrichter, Beschleuniger-Stromversorgungen und Puls-generatoren für Hochleistungs-Radarsysteme, um nur einige Beispiele zu nennen.

#### Flexibles Power-Management

Mit dem «Flexible Power Management» (FPM) ist die variable Zuteilung von Um-

richtern oder Umrichtergruppen auf eine oder mehrere Lasten während des Betriebs gemeint. Zu einem solchen System gehören prinzipiell eine beliebige Anzahl von Umrichtern und eine oder mehrere Lasten wie zum Beispiel Asynchronmotoren. Weiter sind mechanische oder elektrische Schalter vorhanden, welche es erlauben, jede Last mit jedem Umrichter zu verbinden. Dabei können die Verbindungen während des Betriebs des Systems geändert werden. Ein solches System hat gegenüber einem konventionellen System, bei dem jede Last fest mit ihrem eigenen Umrichter verbunden ist, zahlreiche Vorteile:

- Die Betriebssicherheit kann deutlich erhöht werden, da ein defekter Umrichter von der Last abgetrennt und durch einen anderen Umrichter ersetzt werden kann.
- Die Wartung wird vereinfacht und verbessert, da ein Umrichter aus dem System herausgetrennt und durch einen anderen Umrichter im System ersetzt werden kann.
- Die zu installierende Umrichterleistung kann gegenüber einem konventionellen System reduziert werden, vorausgesetzt, es benötigen nie alle Lasten gleichzeitig ihre volle Leistung.

Der letzte und vermutlich wichtigste Punkt soll anhand eines Beispiels erläutert werden: Gegeben sei ein Haus mit vier Aufzügen. Für die Beschleunigung wird eine relativ hohe Leistung von vielleicht 45 kVA, benötigt. Für die Fahrt selbst genügen ungefähr 15 kVA, und während des Stillstands wird keine Leistung aufgenommen. Mit der Einschränkung, dass nicht mehrere Aufzüge gleichzeitig beschleunigt

werden sollen, reichen dann bei Anwendung des Konzepts des FPM sechs Umrichter mit einer Leistung von je 15 kVA völlig aus. Bei einem konventionellen System würden vier Umrichter mit je 45 kVA benötigt. Die zu installierende Umrichterleistung wird in diesem Beispiel also halbiert.

Mit den vielen Vorteilen, die ein System mit FPM bietet, handelt man sich allerdings auch einige technische Probleme ein. Ein grundsätzliches Problem ist das Parallelschalten von Umrichtern, das immer dann auftritt, wenn eine Last aufgrund ihres Leistungsbedarfs von mehr als einem Umrichter gespeist wird. Die Problematik liegt darin, dass man dafür sorgen muss, dass die Stromverteilung zwischen den parallelgeschalteten Umrichtern ausgeglichen ist.

Bild 7 zeigt die zum Testen des Konzepts des FPM aufgebaute Versuchsanlage. Im linken Schaltschrank sind drei Umrichter mit je 4,5 kVA untergebracht, zusammen mit der Steuerung und der Stromverteilungsregelung, welche mit einem Signalprozessorsystem realisiert sind. Davor steht eine Motorengruppe, bestehend aus dem als Last für die Umrichter verwendeten Asynchronmotor und einem Gleichstrommotor, welcher an einen im rechten Rack befindlichen Stromrichter angeschlossen ist. Als zweite Umrichterlast dient ein Widerstand.

#### Leistungselektronische Systeme

In leistungselektronischen Systemen (LES) wird das komplexe Zusammenspiel von Stromrichtern, der sie speisenden Energieversorgung, der Stromrichterlast (z. B. Motoren, andere Netze usw.) mit der

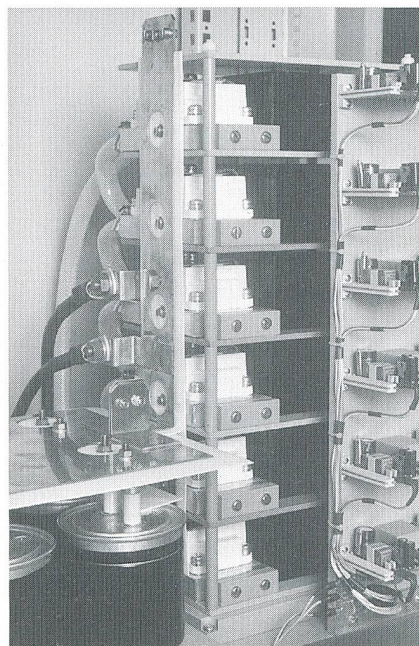


Bild 6 Umrichter-Brücken-zweig mit IGBT-Reihenschaltung

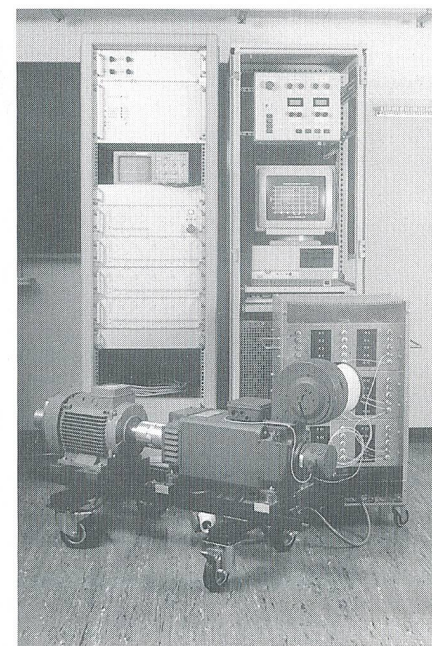


Bild 7 Versuchsanlage für Flexible Power Management



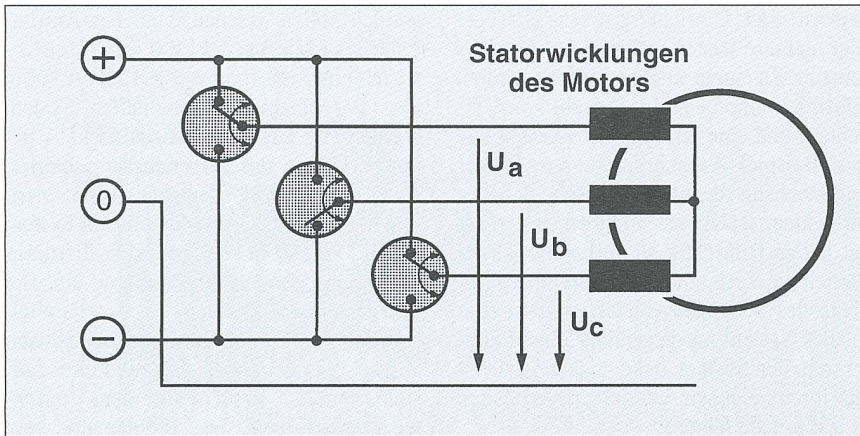


Bild 8 Dreiphasiger Zweipunkt-Wechselrichter

Halbleiteransteuerung, dem Modulator und der Regeleinrichtung behandelt.

Die Schweizer Industrie hat international eine Spitzenstellung auf dem Gebiete der LES. Beispielsweise wurde die weltweit erste Lokomotivserie mit GTO-Umrichter in der Schweiz in Betrieb gesetzt. Grundlage hierfür war der gute Ausbildungsstand der Schweizer Ingenieure in systemorientiertem Denken, die es ihnen ermöglichte, mit am Markt eingekauften Technologien der Mikrorechner und Leistungshalbleiter komplexe Spitzensysteme zu realisieren. Diesen Vorsprung gilt es bei zunehmendem Konkurrenzdruck der anderen europäischen Länder sowie von Japan und – mit Verspätung – den USA zu halten und zu sichern. Vorbedingung hierfür ist

ein qualifizierter Nachwuchs an Ingenieuren, die fähig sind, spezialitätsübergreifende komplexe Systeme zu beherrschen. Diese Ausbildung ist ein kontinuierlicher Prozess, der längerfristig gewährleistet sein muss. Von den rund zehn Teilprojekten im Lesit-Modul 3, welche insbesondere auch diesen Zielen dienen, sollen nachfolgend zwei typische vorgestellt werden.

**Lärmreduktion bei elektrischen Motoren**

Zur Speisung von drehzahlvariablen Motoren werden immer häufiger Wechselrichter verwendet. Sie wandeln eine Gleichspannung in dreiphasige frequenzvariable Wechselspannungen um. Der Motor sollte eigentlich mit sinusförmigen

Spannungen gespeist werden. Wechselrichter sind jedoch geschaltete Systeme, welche die Sinusform nur unvollkommen mit puls förmigen Spannungen mit variierender Breite nachbilden können. Auf das Schalten kann aber nicht verzichtet werden, da dies die einzige Möglichkeit ist, eine Gleichspannung (fast) verlustfrei in eine Wechselspannung umzuformen.

Bild 8 zeigt einen solchen Wechselrichter, dessen Umschalter in Wirklichkeit mit Halbleiterschaltern realisiert sind. Bild 9 oben zeigt eine Phase der erzeugten Wechselrichterausgangsspannung. Es wird immer derart zwischen Plus und Minus hin- und hergeschaltet, dass der Mittelwert (gestrichelt) sinusförmig verläuft.

Wechselrichter produzieren neben der gewünschten sinusförmigen Grundschwingung eine Vielzahl von Oberschwingungen, welche im Motor zusätzliche Geräusche elektromagnetischen Ursprungs verursachen. Die Schaltfrequenzen von Wechselrichtern liegen häufig in einem Bereich der höchsten Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs. Der erzeugte Lärm wird deshalb meist als sehr störend empfunden. Der sogenannte elektromagnetische Lärm wird hauptsächlich durch die radialen Luftspaltkräfte verursacht, welche an der Innenseite des Stators angreifen und den Stator in Vibration versetzen. Der Stator verhält sich wie die Membran eines Lautsprechers und wird zur Lärmquelle. Die radiale Luftspaltkräfteverteilung entlang der Statorinnenseite des Motors ist proportional

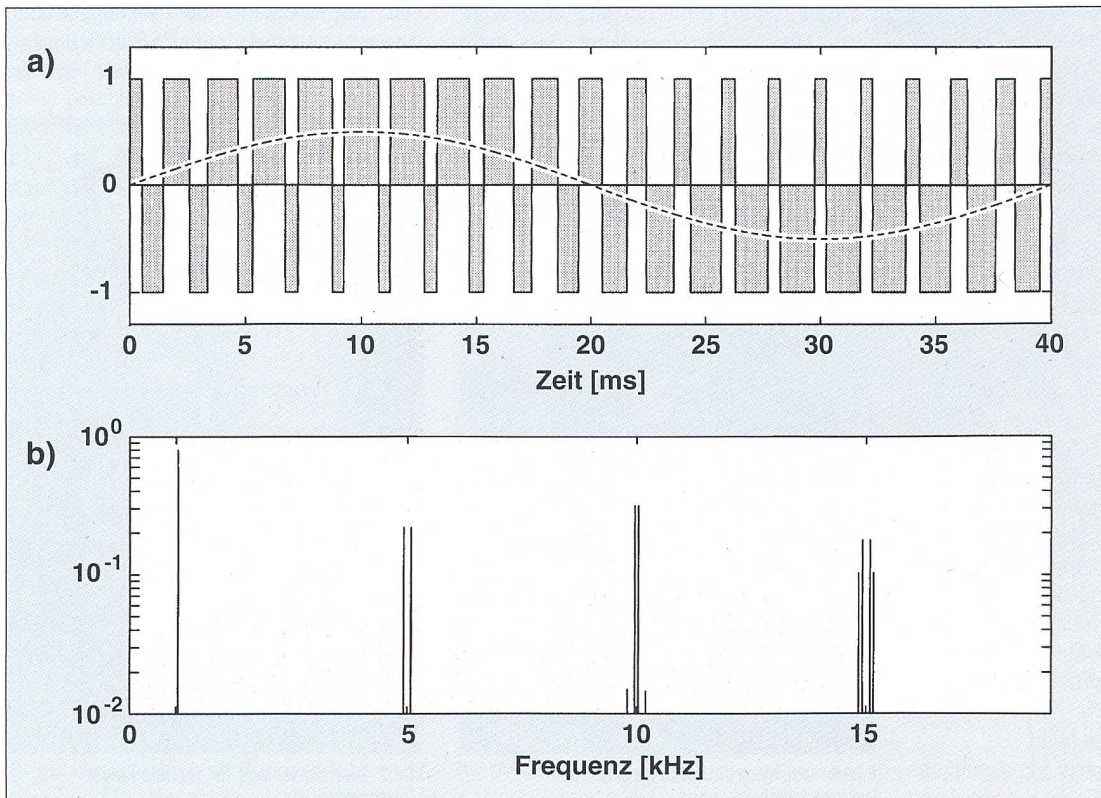


Bild 9 Übliche Art der Wechselspannungserzeugung

- a Wechselrichterausgangsspannung  $u_a$  einer Phase
- b Spektrum der Motorspannung



zum Quadrat der Luftspaltinduktionsverteilung, welche wiederum aus den Wechselrichter Ausgangsspannungen bestimmt werden kann. Über diese theoretischen Zusammenhänge kann der Frequenzgehalt des akustischen Geräusches in Abhängigkeit der Wechselrichter Ausgangsspannung ermittelt werden.

Mit der Modulationsart zur Erzeugung der Pulsmuster zur Steuerung des Wechselrichters können die Lage und Verteilung der Oberschwingungen beeinflusst werden. Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung optimierter Pulsmuster, welche den unvermeidlichen Lärm «ohrfreundlicher» machen. Bild 9 oben zeigt eine übliche Art (Unterschwingungsverfahren) zur Wechselspannungserzeugung. Aus dem darunter abgebildeten Spektrum ist ersichtlich, dass bei dieser Modulationsart einzelne hohe Spektrallinien entstehen, die penetrante Einzeltöne erzeugen.

Durch gezielte Optimierung des Modulationsverfahrens können die Oberschwingungsfrequenzen gleichmässig über den Frequenzbereich verteilt werden (Bild 10). Es entsteht eine viel grössere Zahl von schwächeren Spektrallinien. Der so erzeugte Lärm wird als weit weniger lästig empfunden. Im Vergleich zu anderen Modulationsarten zur Lärmreduktion (z. B. Toleranzbandverfahren) besitzt das untersuchte optimierte Verfahren den grossen Vorteil, dass die Frequenzen und Amplituden der Interharmonischen exakt berechenbar sind. Das erlaubt ein gezieltes Entw

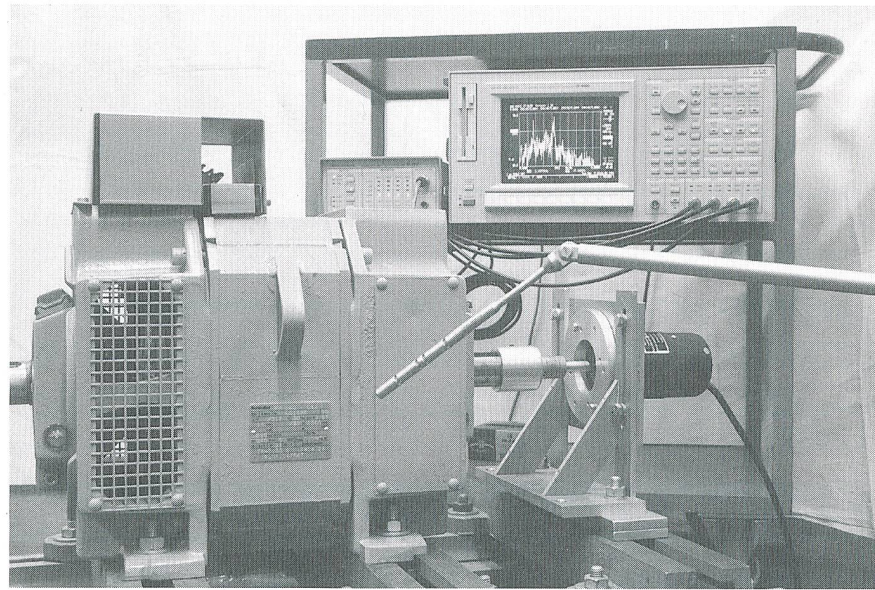


Bild 11 Geräuschmessung am Motor

fen von optimierten Pulsmustern. Mit den Modulationsparametern wird die Frequenzverteilung des Lärmspektrums optimiert. Ausserdem kann man damit die Anregung von mechanischen Resonanzen des Stators vermeiden. In Bild 11 ist die Geräuschmessung dargestellt. Der von der Maschine erzeugte Lärm wird mit einem Intensitätsmikrofon erfasst und mit Hilfe des Frequenzanalysators untersucht.

Die theoretischen Untersuchungen sollen nun durch verschiedene Experimente bestätigt werden. Darum wird momentan

ein drehzahlvariables Antriebssystem bestehend aus U-Umrichter, Asynchronmaschine und Gleichrichter als Last aufgebaut. Zur Erzeugung der Pulsmuster für den Wechselrichter wurde in verschiedenen Diplomarbeiten ein universeller Modulator basierend auf dem DSP 96000 von Motorola aufgebaut. Die grosszügige Unterstützung des Projektpartners Schindler AG beinhaltet die Lieferung einer Asynchronmaschine und eines dreiphasigen Zweipunkt-Wechselrichters. Obwohl das Projekt im Moment erst die erste wesentli

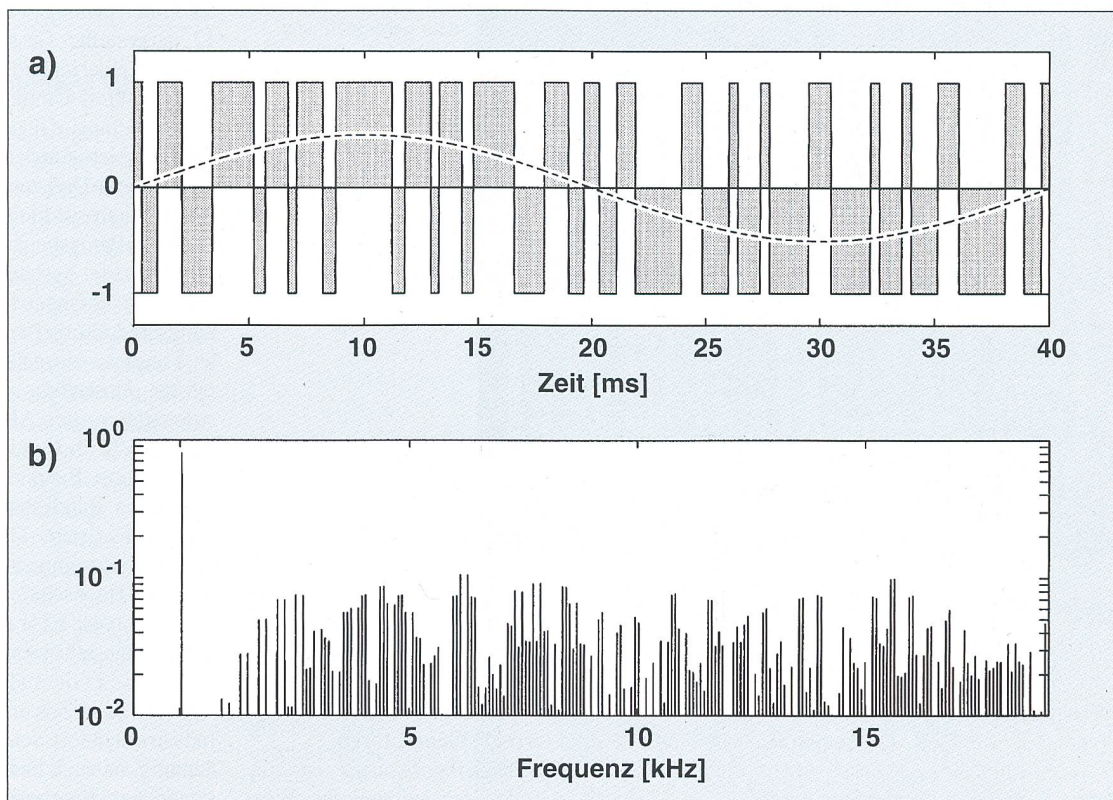


Bild 10 Optimiertes Modulationsverfahren zur Geräuschreduktion

- a Wechselrichter Ausgangsspannung  $u_a$  einer Phase
- b Spektrum der Motorspannung



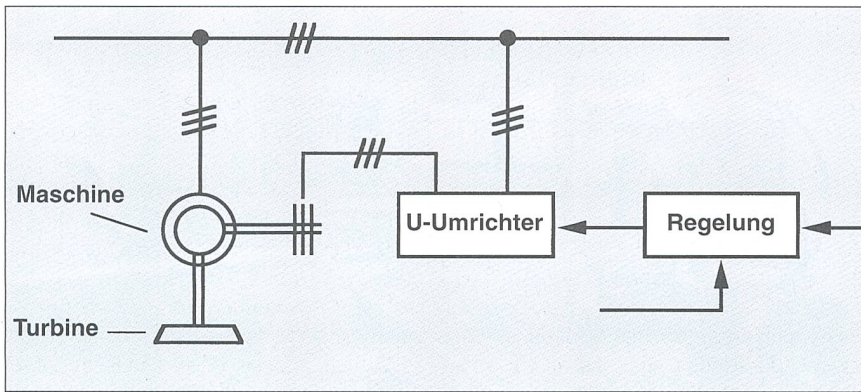


Bild 12 Gesamtsystem, bestehend aus drehfelderregter Maschine, Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter) und Regelung

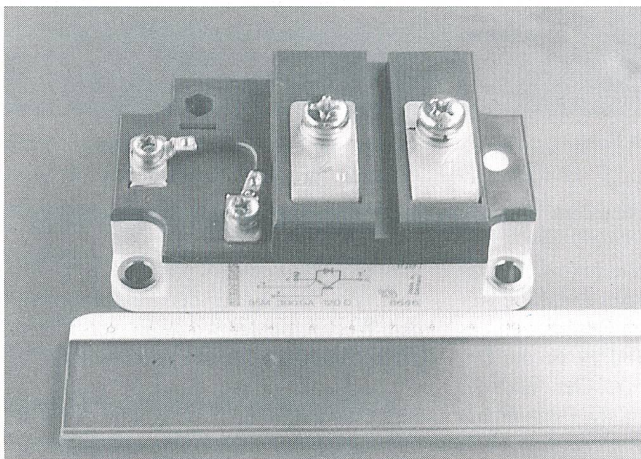


Bild 13 IGBT-Baustein für Stromstärken bis 300 A und Spannungen bis 1200 V

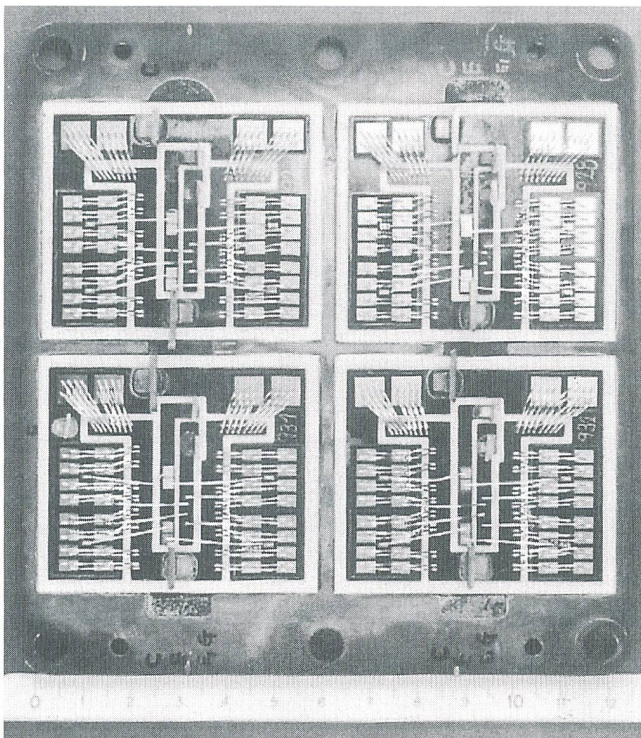


Bild 14 Geöffneter IGBT-Baustein  
IGBT-Baustein der neuen 1200-Ampere-Klasse für Spannung bis 1200 V, nach Gehäuseöffnung

Leistungsgrad optimal ist, von der Höhe des Wasserspiegels und von der geforderten Leistung abhängig. Sie ist auch im Turbinen- und Generatorbetrieb unterschiedlich. Bei konventionellen Synchronmaschinen ist die Drehzahl durch die Netzfrequenz von 50 Hz gegeben und daher konstant. Das Drehmoment und damit die Wirkleistung werden allein von der mechanischen Seite her bestimmt. Mit der Erregung der Maschine kann nur die Blindleistung geregelt werden.

Zur Wirkungsgradsteigerung möchte man die mechanische Drehzahl von der konstanten Netzfrequenz entkoppeln. Dies ist möglich mit einer auf dem Rotor angeordneten Drehstromwicklung. Ein Umrichter speist diese Rotorwicklungen über Schleifringe mit einem einstellbaren Drehstrom. Damit kann ein auf dem Rotor verdrehabares Erregerfeld erzeugt werden. Die Rotorspeisefrequenz muss so eingestellt werden, dass dieses Erregerfeld bezüglich des Statorfeldes synchron umläuft. Da die Umlaufrichtung des Erregerfeldes gleich- oder gegensinnig zur Rotordrehrichtung gewählt werden kann, ist sowohl unter- als auch übersynchroner Betrieb möglich.

Da Stator und Rotor transformatorisch gekoppelt sind, ist über die Amplitude und Phasenlage des Rotorstromes die netzseitige Wirk- und Blindleistung einstellbar. Mit der Wirkleistung kann die Drehzahl der Turbine auf den Wert mit dem besten Wirkungsgrad geregelt werden. Ausserdem kann erst mit der Drehzahlvariation die Leistung im Pumpbetrieb variiert werden.

Die an der ETH durch Lesit ermöglichten Untersuchungen behandeln das in Bild 12 dargestellte Gesamtsystem, bestehend aus drehfelderregter Maschine, Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter) und Regelung. Gegenüber anderen drehzahlvariablen Antrieben wird bei kleinem gefordertem Drehzahlbereich die Umrichterbaugrösse klein.

Nebst Pumpspeicherwerken ist das hier beschriebene System auch für frequenzelastische Bahnnetzkupplungen und wirkungsgradoptimierte, in ein Netz konstanter Frequenz einspeisende Windkraftgeneratoren einsetzbar. Von den Lesit-Industriepartnern, der ABB Industrie AG und der ABB Kraftwerke AG werden in nächster Zukunft Bahnnetzkupplungen für die Deutschen Bundesbahnen in dieser Technologie realisiert. Dadurch entstand eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule. Mit Industriegeldern konnten an der ETH zwei zusätzliche Ingenieure angestellt werden, welche die Lesit-Ergebnisse in die Industrie transferieren.

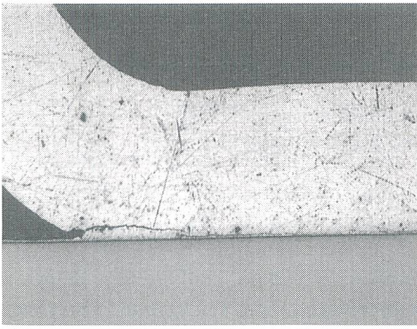
Diese enge Zusammenarbeit ist für den Industriestandort Schweiz von grosser Bedeutung, da auch in Japan intensiv und mit staatlicher Unterstützung an Pumpspei-

che Konzeptphase hinter sich hat, sind die Ergebnisse für den Projektpartner von grossem Interesse, so dass zurzeit eine Patentanmeldung ausgearbeitet wird.

### Spannungszwischenkreis-Umrichter für drehfelderregte Generatoren

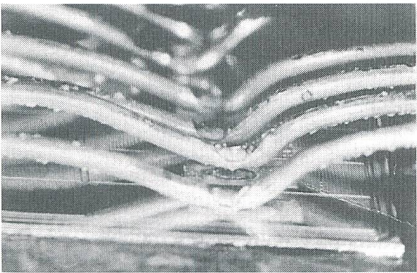
Bei Pumpspeicherkraftwerken ist die Drehzahl, bei der der hydraulische Wir-





**Bild 15** Beginn des Risswachstums an einer Bondierstelle

Das Risswachstum beginnt im Übergang Bondierung-Drahtschlaufe, dem sogenannten «Heel». Die thermische Belastung ist an dieser Stelle am höchsten.



**Bild 16** Seitenaufnahme von Drahtbonds nach Lastwechseltest

Die Bondierstelle in der Bildmitte ist abgesichert.

cherwerken mit drehfelderregten Maschinen gearbeitet wird. Eine Anlage mit einer Pumpleistung von 100 MW ging 1993 in Betrieb. Weitere noch grössere Anlagen sind im Bau.

### Zuverlässigkeit von Leistungshalbleiter-Modulen

Die Entwicklung neuartiger Leistungshalbleiter-Module ermöglicht eine verbesserte und vereinfachte Schaltungstechnik bei Stromrichtern für Motorsteuerungen. Diese Möglichkeiten möchte sich besonders der Elektrofahrzeugbau zunutze machen. Der Einsatz in Strassenbahnen, Lokomotiven, Aufzügen und Elektro-Strassenfahrzeugen erschliesst besonders den IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)-Modulen (Bild 13) neue Anwendungsfelder mit besonders hohen Zuverlässigkeitsanforderungen. Da die Konstrukteure schienengebundener Fahrzeuge von einer Lebensdauer von bis zu 30 Jahren ausgehen, müssen die Bauelemente je nach Einsatzart mit bis zu 5000 passiven und 10 Millionen aktiven Lastspielen mit Temperaturhuben von rund 100 bzw. 70 °C belastbar sein.

#### Packaging

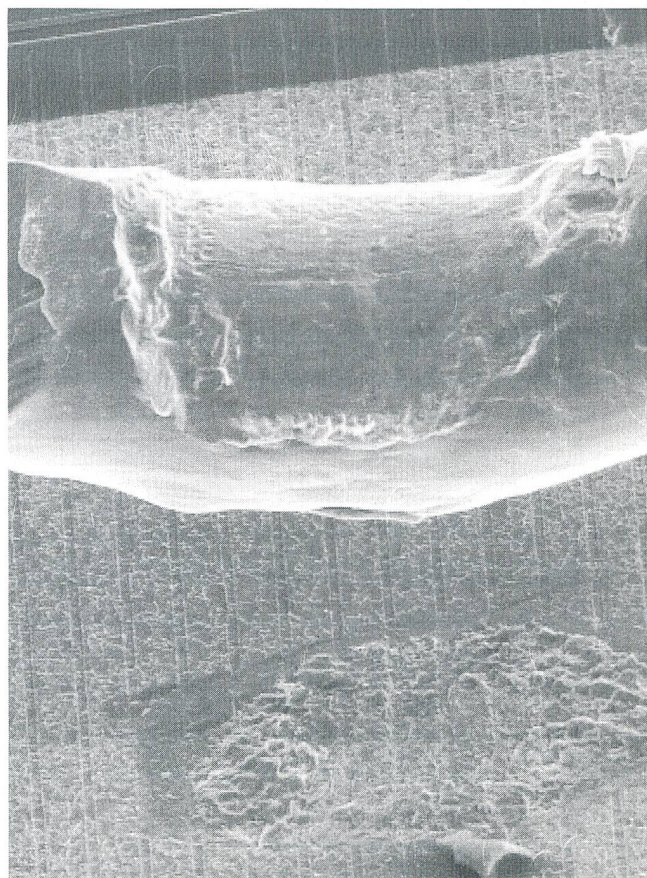
Während das eigentlich aktive Bauteil aus einem Silizium-Chip in dieser Hinsicht

das geringere Problem darstellt (bereits heute sind praktisch alle modernen Elektrofahrzeuge mit elektronischen Steuerungen ausgestattet), bereitet die elektrisch und mechanisch zuverlässige Verkapselung, das sogenannte Packaging, doch gewisse Schwierigkeiten. Waren die bislang üblichen Hochleistungsbauelemente, Dioden und Thyristoren, mit gepressten, grossflächigen Druckkontakten in keramische Rundgehäuse eingearbeitet, so kann diese bewährte und zuverlässige Technik auf die neuen IGBT-Module vorerst nicht mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand angewandt werden. Dies liegt vor allem an der komplizierten Halbleiterstruktur der IGBT, die keine grossflächigen Presskontakte erlaubt. Hinzu kommt, dass die begrenzte Fertigungsausbeute bei der IGBT-Chip-Fertigung nicht die Herstellung komplett verwertbarer Wafer gestattet, was ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz einer Kapselung mit flächiger Presskontaktierung wäre.

#### Aufbau von IGBT-Modulen

Aus den genannten Gründen erfolgt der Aufbau der IGBT-Leistungsmodule in Form einer «konventionellen» Drahtbondier-Technik (Bild 14): Auf einer etwa 5 bis 10 mm dicken Kupfergrundplatte wird eine beidseitig kupferbeschichtete Keramik, die hohen Anforderungen in bezug auf

Wärmeleitfähigkeit, Isolier- und Glimmentladungsfestigkeit genügen muss, aufgelötet. Bereits hier beginnen die Probleme: In der grossflächigen Lötung bilden sich leicht Hohlräume (Lunker), die später die örtliche Wärmeableitung der Module (Schaltleistung bis zu 1 MW bei abzuführenden Eigenverlusten von derzeit bis zu 3 kW) über Grundplatte und Kühlkörper behindern. Die Oberseite der kupferbeschichteten Keramik ist zu Leiterbahnen und Kontaktflächen strukturiert, auf die die eigentlich aktiven IGBT-Chips mit ihrer Rückseite aufgelötet werden, um deren Wärmeabführung zu gewährleisten. Die Chipoberseite ist mit einer der Verschaltung entsprechend strukturierten Alu-Metallisierung beschichtet, auf die wiederum Alu-Dickdrähte (bis zu 0,5 mm Durchmesser) aufgebondet sind. Über diese wegen der hohen Ströme (derzeit bis zu 1200 A/Modul und 10 A pro Einzeldraht) vielfach parallel geschalteten Drähte werden mehrere Chips zusammengeschaltet und dann über die Kupferleiterbahnen auf der Keramik und die dort ebenfalls aufgelöteten Anschlusslaschen zu den aussenliegenden Schraubanschlüssen am Modulgehäuse verbunden. Der so beschriebene Aufbau wird schliesslich noch mit je einer isolierenden Lage weicher und harter Vergussmasse gefüllt; ein Gehäuse aus Weichplastik bildet den Abschluss.



**Bild 17** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer abgesicherten Bondierung

Die Metallschicht des IGBT-Chips bleibt unbeschädigt; Reste des Drahtmetalls sind auf ihr noch zu erkennen.



### Bondierung als Schwachstelle

Die Zuverlässigkeitsprobleme liegen nun vor allem in den kraftschlüssig miteinander verbundenen Schichten des Aufbaus: Die im Betrieb entstehenden Temperaturwechsel bewirken thermomechanische Scherspannungen («Bimetalleffekt») der am Verbund beteiligten Materialien. Als besonders kritisch haben sich dabei die Bonddrähte erwiesen, bei denen beim heutigen Stand der Technik nach etwa 10000 Lastspielen die Bildung feiner Risse im Drahtmaterial entlang der Bondierung beginnt (Bild 15), die schliesslich nach fünfzig- bis hunderttausend Lastwechseln zum völligen Unterbruch durch Abscherung führen (Bilder 16 und 17). Hierdurch erhöht sich die Stromlast und damit die Temperatur der noch verbliebenen Bonddrähte, wodurch sich der Ausfallmechanismus beschleunigt fortsetzt.

Zur Lösung dieser Probleme wurden an der Professur für Zuverlässigkeitstechnik zwei Arbeitsgruppen gebildet, an denen die europäischen Modulhersteller, Anwender, Fertigungsspezialisten und einschlägige Forschungsinstitute mitwirken.

### Zeitraffende Testverfahren

Die sogenannte Testergruppe befasst sich mit der Entwicklung von in der EU vereinheitlichten sowie beschleunigten Testverfahren, insbesondere für den Lastwechsel-Test. Es geht dabei einerseits darum, die Bedürfnisse der Anwender abzudecken. Andererseits soll die Erzielbarkeit relevanter Testresultate in kurzen Zeiträumen durch die Entwicklung von zeitraffenden Zuverlässigkeitsprüfungen ermöglicht werden. Umfangreiche thermomechanische und elektrische Analysen haben mittlerweile zur erfolgreichen Entwicklung stark zeitraffender Testverfahren für die Bondierung geführt, mit denen Schädigungen, die nach einer Million Lastspielen auch im praktischen Einsatz entstehen würden, innerhalb einer Woche herbeigeführt werden können. Diese Arbeiten sind eine wichtige Voraussetzung, um die Wirksamkeit konstruktiver und technologischer Verbesserungen im Modulaufbau zu überprüfen. Ferner gelang es, Zuverlässigkeitsindikatoren für das beginnende Ablösen der Bonddrähte im Modul zu ermitteln und entsprechende Fehlerkriterien in die elektrischen Tests einzuarbeiten.

### Zuverlässigkeit beginnt beim Design

Technische Verbesserungen im Aufbau beschreiben die Arbeit der zweiten Gruppe, der sogenannten Experimentalgruppe. Neben einer bereits weitgehend abgeschlossenen Designoptimierung und ständig aktualisierten Ausfall- und Konstruktionsanalysen liegt ihr Schwerpunkt mittlerweile in

der Optimierung der gegenwärtigen Technologie. Dabei werden zum Beispiel verschiedene Drahtmaterialien, Dicken, Bondmeisselformen und andere fertigungstechnische Parameter im Hinblick auf ihre Anfälligkeit bezüglich der bekannten Ausfallmechanismen auf bestmögliche Zuverlässigkeit optimiert. Die bereits vorliegenden Ergebnisse der Designoptimierung umfassen im wesentlichen Richtlinien für Grösse und Gestaltung der Grundplatte, Anordnung, Unterteilung und Art der Isolierkeramik, Anordnung der Chips und Aspekte der Dickdrahtbondierung und Passivierung.

### Ausblick

In Anbetracht der kurzen Zeitspanne (bis Ende 1995), die zur Lösung dieser Probleme zur Verfügung steht, werden sich die erarbeiteten Lösungen vorwiegend auf experimentelle Ergebnisse stützen und grundsätzliche Zusammenhänge aufzeigen. Eine vertiefte Untersuchung der Gesetzmässigkeit der beteiligten Ausfallmechanismen (Modellbildung) muss Gegenstand eines Folgeprojekts bleiben. Vorarbeiten in dieser Hinsicht sind bereits im Rahmen eines KWF-Projekts über SMT-Lötstellen mit einem Pitch von 0,3 mm angelaufen, welches in Zusammenarbeit mit der Abteilung für

Werkstoffe in der ETH in der Realisierungsphase steht.

## Zusammenfassung

Die im Rahmen des Schwerpunktprogramms Lesit an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit der Schweizer Industrie erarbeiteten Resultate sind wissenschaftlich und wirtschaftlich von grosser Tragweite für die Schweiz. Bereits nach zwei Jahren zeigt sich die Effizienz des Programms in verschiedenen Patentanmeldungen, vielversprechenden Prototypen und dem erleichterten Wechsel von Lesit-Mitarbeitern aus dem Umfeld der Hochschule in die Industrie.

## Referenzen

- [1] K. Heumann: Impact of turn-off semiconductor devices on power electronics. EPE journal, pp. 181-192, 1991.
- [2] V. A. K. Temple: MOS controlled thyristors. IEDM Tech. Dig., pp. 282-285, 1984.
- [3] V. Temple, F. Lokuta, D. Burke and B. Arlt: MCT and the future. Proc. PCIM'93, pp. 277-297, 1993.
- [4] H. Dettmer, W. Fichtner, F. Bauer and T. Stockmeier: 4.5 kV MCT with buffer layer and anode short structure. Proc. ISPSD'94, pp. 13-17, 1994.

# Recherche de pointe dans le cadre de la collaboration entre hautes écoles et l'industrie

## Le programme prioritaire Lesit réunit hautes écoles et industrie Deuxième partie: Electronique de puissance

L'électronique de puissance est à la base de la maîtrise et de la transformation de l'énergie électrique et de ce fait une des sciences d'ingénieur de première importance pour notre société. Seulement un vaste programme de recherche bien coordonné comme Lesit peut aborder avec suffisamment de chances de succès les problèmes interdisciplinaires. L'énorme progrès de la technologie des semi-conducteurs mène à de nouveaux composants à fonctions élargies grâce à l'intelligence intégrée. Ces derniers exigent des concepts innovatifs de communication et de commande et permettent des applications d'un genre nouveau dans la technique de propulsion ou dans la distribution de l'énergie électrique. Les projets élaborés dans le cadre de Lesit comprennent non seulement des technologies de fabrication nouvelles, mais aussi du design, des simulations et des implémentations de nouveaux composants, de circuits et de systèmes. De plus, la garantie de fiabilité devient un aspect important dans la tâche de développement et doit déjà être prise en considération lors de la phase de définition.

Dans la première partie de cet article nous avons expliqué la motivation et l'organisation du programme prioritaire Lesit ainsi que son cadre politique et industriel. Dans les prochaines parties nous allons présenter des exemples de cette collaboration réussie entre industrie et hautes écoles. Cette deuxième partie est consacrée plus spécifiquement à l'électronique de puissance soit au niveau des éléments semi-conducteurs, des circuits ou soit de systèmes complets. Ces thèmes sont traités dans les modules de Lesit 1 (éléments semi-conducteurs d'électronique de puissance), 2 (circuits d'électronique de puissance) et 3 (systèmes d'électronique de puissance) ainsi que 9 (fiabilité).