



(Quelle: industrieblick/fotolia)

# Die Zukunft gehört dem Gleichstrom

**Für den sicheren Betrieb in Gleichstromanwendungen werden Leistungsschalter benötigt, die in der Lage sind, Betriebsströme zu führen und zu schalten sowie Fehlerströme oder Kurzschlüsse zu unterbrechen. Daher ist es von großer Bedeutung, die physikalischen Vorgänge, die beim Ein- oder Ausschalten eines Gleichstromkreises ablaufen, nachvollziehen zu können.**

Von Dr. Dieter Volm

Die Zukunft der Energieerzeugung ändert sich. Infolge einer steigenden Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen sowie neuer Verbrauchertechnologien wie Stromspeichersysteme oder Elektrofahrzeuge erwachsen neue Herausforderungen für Bauteilhersteller. Das zuverlässige und kostengünstige Speichern elektrischer Energie ist der Schlüssel, um einen wechselseitigen Energiefluss zwischen Energieerzeugern und -verbrauchern zu ermöglichen und gleichzeitig das Netz zu stabilisieren.

Der weitere Ausbau der Photovoltaik wird entscheidend davon abhängen, wie sie sich in das bestehende

Netz integrieren lässt. Dies ist ein Grund dafür, dass „Electricity Storage“, also Energiepeicherung, als einer der thematischen Schwerpunkte in der Solarbranche gilt [1, 2]. Auf dem Markt bieten, neben der herkömmlichen Bleisäure-Technik, Lithium-Ionen-Akkus einen Kompromiss aus Leistung, Energiedichte und Wirkungsgrad. Die einzelnen Speichereinheiten lassen sich leicht skalieren und werden in verschiedenen Systemen zusammen mit Solarwechselrichtern von 2 bis 50 kWh angeboten.

Die hohe Energiedichte – z.B. bei Lithium-Ionen-Akkus – kann im Kurzschlussfall Ströme von mehreren

1.000 A verursachen, die zu Explosionen oder Brandschäden führen. Es ist deshalb unbedingt notwendig, entsprechende Batteriemanagementsysteme (BMS) in die Applikation zu integrieren. Sie sind zuständig für den aktiven Zellspannungsausgleich, die Strom- und Spannungsüberwachung sowie entsprechende Sicherheitsfunktionen. Viele Erfahrungen können aus dem Bereich der Elektrofahrzeuge übernommen werden, in denen Hochvoltakkus seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz sind [3].

Um die bei Solaranlagen gegebenen Spannungen bis über 1.000 V auch im Störfall sicher trennen zu können, werden DC-Lastrelais als sogenannte DC-Lasttrennschalter verwendet. Diese müssen die auftretenden Leistungen beherrschen und die Normen über Luft- und Kriechstrecken erfüllen. Zum Schalten hoher Gleichstromlasten bis 300 kW sind bisher nur wenige Lösungen am Markt erhältlich. In den folgenden Abschnitten wird dargelegt, wie kompakte DC-Lastrelais aufgebaut sein müssen und welche physikalischen Prinzipien dabei zur Anwendung kommen [4, 5].

## Grundlagen der Stromführung und Überstromverhalten bei einem Schaltkontakt

Im Bereich der Energietechnik mit Strömen bis zu einigen 100 A ist es notwendig, den Übergangswiderstand von Schaltkontakten so zu optimieren, dass keine nennenswerte Erwärmung auftritt. Um die umgesetzte Leistung an der Engstelle des Kontaktes gering zu halten, strebt man einen Bereich an zwischen 100  $\mu\Omega$  und 1 m $\Omega$ . Damit bleibt der Leistungsabfall am Kontakt im Bereich von wenigen Watt, die über die Zuleitungen oder Kühlkörper abgeführt werden müssen. Bei einem Strom von 100 A und einem Kontaktwiderstand von 1 m $\Omega$  sind das 10 Watt Verlustleistung. Der Übergangswiderstand  $R_k$  ist im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig: von der Wahl des Kontaktmaterials und der Kontaktkraft  $F_k$ . Dies wird in **Formel 1** verdeutlicht, die in einer ersten Näherung die gegenseitige Abhängigkeit aufzeigt:

$$R_k = \gamma \cdot \sqrt{H/F_k} \quad (1)$$

Hierin gelten:  $H$  = Härte des Kontaktwerkstoffs,  $F_k$  = Kontaktkraft und  $\gamma$  = spezifischer Widerstand des Kontaktwerkstoffs.

Das Ziel ist es, durch die Wahl eines geeigneten Kontaktwerkstoffes mit guter elektrischer Leitfähigkeit und einem effektiven magnetischen Antrieb,

der die notwendige Kontaktkraft aufbringt, die gesamte Verlustleistung zu minimieren. Es ist offensichtlich, dass eine Erhöhung der Kontaktkraft durch eine höhere Spulenleistung erkaufte wird. Diese liegt ebenfalls im Bereich von 5 bis 10 W für Schaltgeräte im dreistelligen kW-Bereich. Die Kunst besteht nun darin, hier das Minimum zwischen Spulenverlusten und Verlusten am Kontakt zu finden.

Bei einem Kupferkontakt benötigt man eine Kontaktkraft von mindestens 10 N, um einen stabilen Kontaktwiderstand unter einem 1 m $\Omega$  zu erreichen. Durch Oxidation und Fremdschichten kann der reale Wert deutlich von obiger Formel abweichen, die in ihrer Näherung von einem idealen sauberen Kontakt ausgeht. Zudem ist der Kontaktwiderstand keine konstante Größe, sondern ändert sich über die Lebensdauer – je nach Beanspruchung und Umgebungsbedingungen.

Neben niedrigem und stabilem Kontaktwiderstand ist die Verschleißfestigkeit bei geschlossenem Kontakt bei Über- oder Kurzschlusslast ein entscheidendes Kriterium. Die Schaltelemente müssen in der Lage sein, kurzzeitig hohe Lastströme zu führen und diese auch abzuschalten. Moderne Akkusysteme können Kurzschlussströme von mehreren 1.000 A entwickeln und dabei erhebliche Schäden verursachen. Bei dieser Strombelastung treten elektrodynamische Kräfte auf, die der Kontak-

kraft entgegenwirken. Das Kontaktsystem muss nun so ausgelegt werden, dass ein Überlaststrom nicht zu einer unzulässigen Kontaktkraftverminderung führt. Im Extremfall wird bei einer – durch Lorentzkräfte bedingten – Kontaktkraftverringern der Kontaktwiderstand steigen; zugleich steigt auch die Temperatur stark an. Wird dabei die Schmelztemperatur überschritten, verschweißen die Kontakte unweigerlich.

Ist der Strom in der Lage, Lorentzkräfte zu erzeugen, die über der Kontaktkraft liegen, so öffnen sich die Kontakte und es entsteht ein Lichtbogen. In diesem Fall steigt der Leistungsumsatz so dramatisch an, dass unter Umständen die Schaltkammer explodiert. Als Folge muss zusätzlich eine Sicherung im Stromkreis eingebaut sein, die den Stromkreis öffnet.

Die Abhebekraft steigt dabei mit dem Quadrat des Stroms und kann näherungsweise berechnet werden [1, 6]:

$$F_A = 0,1 \cdot I^2 \cdot \ln \sqrt{\pi \epsilon H / F_k} \quad (2)$$

Hierin steht  $H$  für die Härte des Kontaktwerkstoffs,  $I$  für Strom,  $F_A$  für die Abhebekraft durch strombedingte Lorentzkraft und  $F_k$  für die Kontaktkraft sowie  $\epsilon$  für den Koeffizienten der Oberflächenbeschaffenheit.

Für eine einfache Abschätzung mit einem AgNi40-Kontaktwerkstoff kann man die Formel zudem reduzieren auf  $F_A = 0,33 \cdot (I/kA)^2$ . Daraus folgt eine Ab-

# Unsere Power Inductor Familie von klein und filigran bis GROSS und STROMSTARK



- Ab Lager verfügbar
- Kostenlose Muster innerhalb 24h
- Laborsortimente mit kostenloser Wiederbefüllung
- Software-Tools zur Produktauswahl
- Design-In Beratung vor Ort
- IC-Referenzdesigns

*Keine Nachwuchssorgen!*





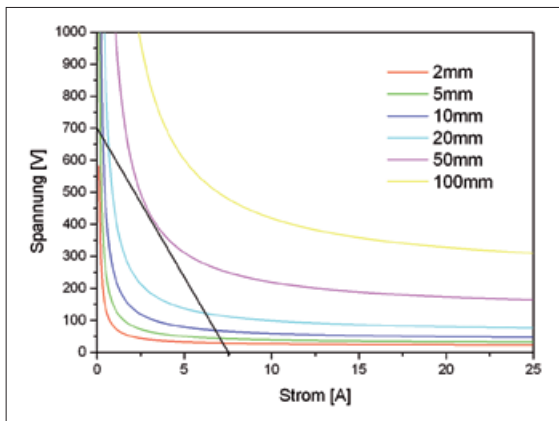


Bild 1. Charakteristische Kurvenschar eines Lichtbogens mit der Länge  $k$  als Parameter. (Bilder: Panasonic Electric Works)

hebekraft von 8,25 N bei 5.000 A. Falls die Materialparameter nicht bekannt sind, kann die Formel als erste Abschätzung für andere Kontaktwerkstoffe verwendet werden.

Für Kupfer mit einer größeren Härte benötigt man bei 5.000 A mindestens 12 N, um ein Abheben der Kontaktfeder zu vermeiden. Die Kontaktkraft bestimmt damit den maximalen Kurzschlussstrom, den ein Relais ohne Beschädigung führen kann. Treten höhere Ströme auf, so sind die Kontakte entsprechend abzusichern.

### Öffnen stromdurchflossener Kontakte

Bei der Festlegung des Ausschaltvermögens muss sichergestellt sein, dass unter den gegebenen Schaltbedingungen (Strom und Spannung) der Lichtbogen bei vollständig geöffneten Kontaktstücken erlischt. Die sich beim Abschalten einstellenden Lichtbogenbrenndauern müssen so kurz sein, dass die mechanische Belastung des Kontaktinnenraums durch den Druckaufbau nicht beschädigt wird. Zudem tritt, solange der Lichtbogen brennt, ein Materialverlust auf, der die Kontaktoberfläche nachhaltig schädigt. Das Material verdampft und kondensiert als leitfähiges Material in der Schaltkammer und verringert die Isolationsfestigkeit des Relais [8].

Ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und Kontaktabstand kann in der empirisch ermittelten Lichtbogengrenzkurve nach Ayrtton dargestellt werden [9, 10].

$$U_{\text{arc}} = a + b \cdot k + (c + d \cdot k) / I \quad (3)$$

Hierin gelten: Koeffizienten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$ , der Kontaktabstand  $k$  und der Strom  $I$ .

Die Koeffizienten variieren je nach Kontaktmaterial, Wärmeabfuhr sowie Kontaktvolumen und werden experimentell bestimmt. Für feststehende Kupferelektroden in Luft finden sich folgende Werte in der Literatur:  $a$  [V] = 17;  $b$  [V/cm] = 22;  $c$  [VA] = 20;  $d$  [VA/cm] = 180

Die entsprechende Hyperbelschar ist in Bild 1 für Bogenlängen bzw. Kontaktabständen von 2 bis 100 mm aufgetra-

ßen bestimmt: Zunächst ist das Kontaktmaterial der bestimmende Faktor. Auf reinen Materialien wie Kupfer verdampft das Material am Lichtbogenfußpunkt, und der Lichtbogen wandert sehr rasch ohne äußeren Einfluss durch den entstehenden Gasdruck, der dabei erzeugt wird. Er lässt sich daher mit einem zusätzlichen externen Magnetfeld sehr schnell in eine Löschkammer ablenken. Das Kontaktmaterial zeigt dabei relativ wenig Abbrand. Bei heterogenen Werkstoffen wie  $\text{AgSnO}_2$  verweilt der Lichtbogen auf der Komponente mit höherer Siedetemperatur ( $\text{SnO}_2$ ), weil das Material mit niedriger Siedetemperatur (Ag) verdampft und den Lichtbogen quasi festhält. Um den Lichtbogen dennoch zu bewegen, müssen die Schaltstücke entsprechend geformt werden, und das Magnetfeld muss stärker als bei reinen Kupferkontakten sein. Die Blasmagnete werden dazu möglichst nahe an den Kontakt-



Bild 2. EV-Relais und offene Kontaktkammer mit abgelenktem Lichtbogen.

gen. Zusätzlich ist die Widerstandsgerade für 700 V(DC) und 7,5 A in das Diagramm eingezeichnet. Will man diese Leistung mit einem Kupferkontakt in Luft trennen, dann ist die kritische Lichtbogenlänge durch jene Kurve bestimmt, welche die Widerstandslinie gerade berührt. Zur vollständigen Löschung des Lichtbogens benötigt man daher mindestens 50 mm Kontaktabstand.

### Kontaktwerkstoffe und Blasmagnete zur Lichtbogenwanderung

Wichtig ist es, den Lichtbogen beim Öffnen des Stromkreises, der mehrere 1.000 °C heiß ist, in Bewegung zu halten, um ein großflächiges Aufschmelzen des Kontaktmaterials zu verhindern. Diese Bewegung wird durch zwei Grö-

ößen platziert, um das Plasma mit maximaler Feldstärke abzulenken. Stromrichtung und Magnetfeld müssen dabei senkrecht zueinander stehen und entsprechend gepolt sein, damit der Lichtbogen in die Löschkammer abgelenkt und die effektive Lichtbogenstrecke vervielfacht wird.

Der Lichtbogen erlischt, sobald eine seiner Existenzvoraussetzungen nicht mehr erfüllt ist, also wenn der Mindeststrom oder die Mindestspannung zum gegebenen Elektrodenabstand nicht mehr zur Verfügung steht. Dies wird erreicht

- durch eine hinreichend große Kontaktöffnung
- durch Hintereinanderschalten mehrerer Trennstrecken, die sich addieren

**LIQUID CRYSTALS**  
als Folien und Thermometer  
[www.celsi.com](http://www.celsi.com)  
Kostenlose Muster auf Anfrage an [celsi@spirig.com](mailto:celsi@spirig.com)

→ durch eine zusätzliche Lichtbogenkühlung mit Schutzgas

### Löschverfahren und Schaltmedien für DC-Lastrelais

Weit verbreitet sind Löschmedien wie Wasserstoff,  $\text{SF}_6$  oder Stickstoff, die in einer gekapselten Lichtbogenlöschkammer die zu trennenden Kontaktstücke umschließen. Wasserstoff hat dabei das geringste Molekulargewicht und damit eine sehr gute Wärmeableitung vom Plasma des Lichtbogens. Als Folge eignet es sich hervorragend als Schaltmedium. Die Elektronen und Ionen aus dem Lichtbogen werden bei Zusammenstößen optimal gekühlt. Ein weiterer Vorteil ist die erhöhte Spannungsfestigkeit gegenüber Luft. Die Nachteile liegen in der leichten Flüchtigkeit des Wasserstoffgases und der damit verbundenen schwierigen Verarbeitung im Produktionsprozess. Die Schaltkammer wird daher vorzugsweise mit einer Keramik gekapselt. Die Kammer muss eine sehr geringe Leckrate aufweisen, um über einen Zeitraum von über zehn Jahren den Wasserstoffgehalt ausreichend konstant zu halten. Das ist technisch machbar – aber in der Produktion sehr aufwendig.

### Bestehende Lösungen – zum Beispiel die EV-Serie

Bei der EV-Relais-Serie von Panasonic wurden die vorhin beschriebenen physikalischen Prinzipien konsequent umgesetzt. Die Kontaktöffnung wird durch einen Brückenkontakt mit reinem Kupfer als Kontaktwerkstoff realisiert. Die Kontakte befinden sich in einer mit Wasserstoff gefüllten Kammer. Ein Permanentmagnet (ca. 15 mT) erzeugt ein nahezu homogenes Magnetfeld. Durch diese Anordnung kann die Kontaktöffnung auf ein Minimum reduziert werden. Bild 2 zeigt einen Ausschnitt der Kontaktkammer mit abge-

lenktem Lichtbogen. Die effektive Bogenlänge wird um mehr als das Zehnfache verlängert und beträgt ca. 30 mm. Als Folge kann die Schalteinheit sehr kompakt gebaut werden. In der Ausführung bis 300 A erreicht die Kontaktkraft 15 N und ist geeignet, um Kurzschlussströme bis 6.000 A für 5 ms zu führen, ohne dabei zu verschweißen. Die Spulenverlustleistung wird in diesem Relais – nach einem Stromimpuls beim Einschalten – durch einen internen Steuerkreis auf 3,6 W Halteleistung abgesenkt, ohne die Kontaktkraft zu verringern. Das EV-Relais ist mit Schraubanschlüssen versehen, um eine effektive Wärmeabfuhr zu ermöglichen.

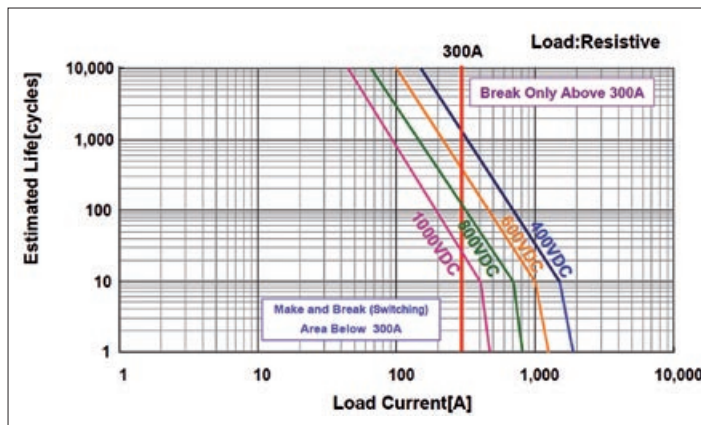


Bild 3. Schaltvermögen eines EV300A-Relaismodells.

In Bild 3 ist das Schaltvermögen bzw. die Anzahl der zu erwartenden Schaltspiele über dem Strom in Abhängigkeit von der Schaltspannung aufgetragen. Im Diagramm begrenzt die senkrechte rote Linie den Wert für den Einschaltstrom. Für Anwendungen über 300 A kann das Relais die Last zwar noch abschalten, aber die Kontakte würden beim Einschalten verschweißen. Interessant ist auch die Tatsache, dass eine Lichtbogenlöschung bei 1.000 V und 300 A möglich ist. Diese Leistung erfordert Kontaktöffnungen, die weit über 300 mm liegen. Wie bereits erwähnt, beträgt die tatsächliche Bogenlänge im Relais aber nur ca. 30 mm. Dies wird durch die Verwendung von Wasserstoffgas ermöglicht, das die Bogenlöschung effektiv unterstützt. Gegenüber Luft kann die Lichtbogenstrecke um den Faktor 10 verringert werden.

Mit dieser Konstruktion einer gasdichten Kammer lassen sich die Schaltgeräte deutlich kompakter kon-



**Stromversorgungen**  
in allen Leistungsklassen  
AC- und DC-Quellen, elektron.  
Lasten (auch mit Netz-Rückspeisung)  
Ladegeräte, Quelle-Senke  
Systeme für Entwicklung,  
Forschung und Industrie mit  
höchster Leistung und Dynamik

### NEU Quelle-Senke mit Netz-Rückspeisung



### AC Quellen made in Germany



1- und 3-phasig bis 2 kHz  
von 500 VA bis über 100 kVA  
Netz-Rückspeisung auf Anfrage.  
Simulation weltweiter Netze.

### HEIDEN ist Ihr Partner für:

- Power Supply/arbitrary
- elektronische Lasten
- **NEU** 6 kW Ladegeräte von 16 bis 600 V DC
- AC-Quelle/Frequenzwandler
- Meßgeräte/Analysatoren
- **HQSR8: Quelle-Senke mit Netz-Rückspeisung** bis 1000 V und bis  $\pm 800$  A

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



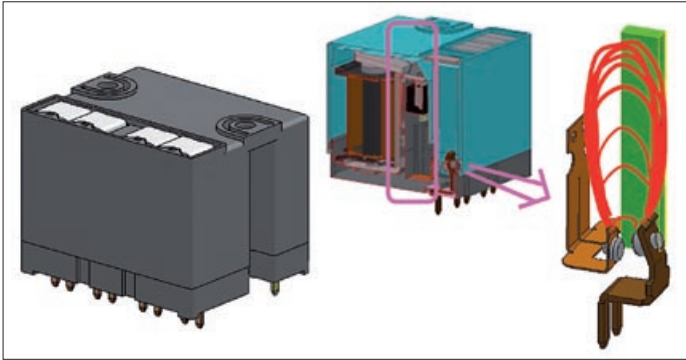


Bild 4. Das HEV-1000V-DC-Trennrelais in der Klasse bis 20 kW. In der rechten Bildhälfte wird eines von insgesamt vier Kontaktpaaren vergrößert dargestellt. Der Magnet (grün eingezeichnet) lenkt den Lichtbogen in die Löschkammer ab.

struieren als vergleichbare luftoffene Systeme. Damit ergibt sich ein weiterer Vorteil: Es gibt keine offenen Funkenstrecken. Das Relais kann damit auch in ATEX-geschützten Umgebungen eingesetzt werden. Der sehr kompakte

dige Wasserstoff aus der Wand der Löschkammer gewonnen, die aus einem organischen Isolator besteht. Dazu wird der Lichtbogen durch ein Magnetfeld so abgelenkt, dass er eine möglichst große Fläche des Isolators über-

reich zu genügen und die Bauteilkosten zu minimieren, wurde bei der Relaisserie HEV-1000V (Bild 4) auf eine gekapselte Schaltkammer verzichtet. Dafür wird eine sogenannte Hartgaslöschung verwendet. In Hartgas-Schaltern wird der zur Löschung notwendige

effektiv verlängert und in kürzester Zeit gelöscht. Selbst bei einer Abschaltleistung von 10 A/700 V(DC) pro Kontakt bleibt die Lichtbogenbrenndauer unter 5 ms. Dies ist in Bild 5 gezeigt. Dadurch können mehr als 50 Schaltspiele erreicht werden, was für viele Anwendungen ausreichend ist. Reduziert man die Spannung auf 600 V(DC), so geht die Lichtbogenbrenndauer auf unter 3 ms zurück. Damit sind dann mehr als 1.000 Abschaltungen möglich. Schaltet man beide Brückenkontakte in Serie, kann entsprechend die doppelte Spannung getrennt werden. Das neue HEV-1000V-Relais ist mit Lötanschlüssen ausgestattet und erlaubt ein kompaktes Layout auf der Leiterplatte. Mit dem HEV-1000V ist es gelungen, das im Moment leistungsfähigste DC-Trennrelais für den Strombereich bis 20 A auf den Markt zu bringen. Die Luft und Kriechstrecken sind dabei für einen Betrieb bis 1.000 V(DC) ausgelegt. go

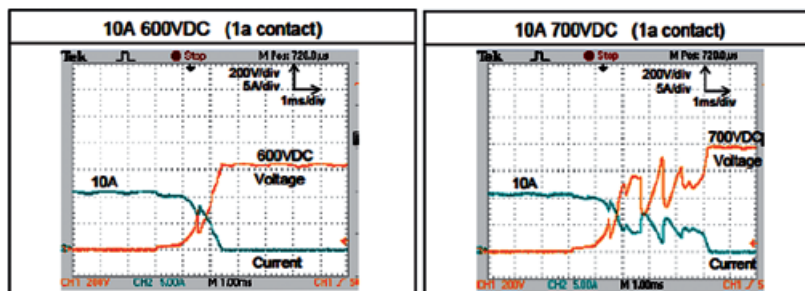


Bild 5. Strom- und Spannungsverlauf beim Ausschalten eines Brückenkontaktes bei 600 V(DC) bzw. 700 V(DC).

Schalter ist in verschiedenen Ausführungen von 10 bis 300 A erhältlich und wird überwiegend in Batterietrenneinheiten bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Trennung von Solarmodulen vom Wechselrichter.

### Innovation: das neue HEV-1000V-Relais

Für Anwendungen bei Solarinstallationen gekoppelt mit einem Batterie-Speichersystem bis 5 kW ist es ausreichend, Ströme bis 20 A bei 800 bis 1.000 V(DC) zu schalten. Um dem Trend im Solarbe-

streicht. Allerdings lassen sich nur wenige Abschaltungen bei Volllast durchführen, da sich das feste Isoliermaterial verbraucht.

Die Anzahl der Sicherheitsabschaltungen muss also in enger Abstimmung mit der Anwendung bestimmt werden. Üblicherweise liegen diese in einer Größenordnung von 10 bis 100 Schaltzyklen bei Maximallast. Im Normalbetrieb wird jedoch überwiegend lastfrei geschaltet und der Strom lediglich geführt. Da der Schaltlichtbogen in Luft getrennt wird, muss die Kontaktöffnung gegenüber den gasgekapselten Systemen deutlich erhöht werden. Erreicht wird dies durch das Hintereinanderschalten von zwei Brückenkontakten.

Auf diese Weise sind vier Kontaktöffnungen in Serie geschaltet, die sich zu einem Kontaktabstand von mehr als 10 mm addieren. Der Lichtbogen wird auch hier durch ein Magnetfeld in die Hartgaslöschkammer geblasen, dabei

### Literatur

- [1] Scheer, H.: Der Energetische Imperativ. Kunstmann Verlag.
- [2] Photon 2012-06 Juni, Seite 99.
- [3] Zimmer, G.: Die Lektionen für das Batterie Management sind gelernt. Elektronik automotive 2011, Heft 6/7, S. 24 bis 27.
- [4] Meckler, P.: Fehlerquelle mit Brandgefahr. Elektronik Informationen 6.2012.
- [5] Carvou, E.; Ben Jema, N.: Contact behaviour of electric vehicle-battery junction box under high shorting and breaking current. Proceedings of ICEC-ICREPEC2012.
- [6] Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Springer-Verlag.
- [7] Ciobotaru, C.: Wenn eine Trennung unumgänglich erscheint. Elektronik Industrie, März 2011.
- [8] Dr. Behrens, V.: Kontaktwerkstoffe für Niederspannungs-Schaltkontakte. 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, VDE-Fachbericht Oktober 2009.
- [9] Prof. Dr. Fröhlich, K.: EEH – High Voltage Laboratory, ETL H28; EEH – High Voltage Laboratory, ETL H35.2; 13. Oktober 2008.
- [10] Rieder, W.: Plasma und Lichtbogen. Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1967.



Dr. Dieter Volm

ist Senior General Manager im Bereich Business Development Components bei Panasonic Electric Works Europe AG, Holzkirchen.

info.peweu@eu.panasonic.com

