Produktionsverfahren in der Leistungselektronik

18

Rik W. De Doncker, Isabel Austrup, Sven Kalker und Lukas Ruppert

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau und potenzielle Produktionsausführungen der verschiedenen leistungselektronischen Komponenten erläutert. Dabei wird auf die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) von Leistungshalbleitern, auf die verschiedenen Optionen der Kühlung sowie auf die potenziellen Ausführungen von passiven Bauelementen und Treiberschaltungen eingegangen. Zuletzt werden Maßnahmen zum Schutz vor elektrostatischer Entladung während der Produktion vorgestellt.

R. W. De Doncker (✉)
Universitätsprofessor, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

I. Austrup
Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

L. Ruppert
Gruppenleiter, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de

S. Kalker
Oberingenieur, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: post@isea.rwth-aachen.de;

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_18

18.1 Aufbau- und Verbindungstechnik von Leistungshalbleitern

Die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) ermöglicht die elektrische sowie thermische Anbindung des Halbleiters und schützt ihn vor Umgebungseinflüssen.

In Leistungsmodulen stellt die Chip-Anbindung gleichzeitig den thermischen und den elektrischen Pfad dar. Für die elektrische Anbindung können an der Oberseite Bonddrähte und an der Unterseite eine Lotschicht verwendet werden. Das Substrat ermöglicht die thermische Anbindung und ist gleichzeitig elektrisch isolierend. Häufig wird ein „Direct-Copper-Bonded“ (DCB)-Substrat verwendet, das aus einer Keramikschicht mit einer Kupfermetallisierung auf der Ober- und Unterseite besteht. So wird der thermische Pfad vom elektrischen getrennt. Eine Grundplatte sorgt für eine möglichst homogene Verteilung der Wärme im Modul. Das „Thermal Interface Material“ (TIM) zwischen Grundplatte und Kühlkörper sorgt für eine gute thermische Anbindung.[1]

Der Aufbau eines beispielhaften Leistungsmoduls ist in Abb. 18.1 zu sehen.

Die zahlreichen einzelnen Komponenten des Leistungsmoduls werden im Folgenden näher betrachtet und beschrieben.

Gehäuse

Einflüsse aus der Umgebung – etwa Feuchtigkeit, Staub, Gase und Strahlung – können unter anderem zu Korrosion und Spannungsüberschlägen führen. Aus diesem Grund werden die Leistungshalbleiter durch ein Gehäuse geschützt. Dabei kommen in der Leistungselektronik verschiedene Gehäusearten zum Einsatz. Bei einem diskreten Aufbau wird ein Halbleiter von einer Vergussmasse umschlossen, die gleichzeitig als Gehäuse dient. Diese Technik wird hauptsächlich bei niedrigen Leistungen verwendet und kommt bei Elektrofahrzeugen zum Beispiel in Nebenaggregaten zum Einsatz. Für größere Leistungsklassen, wie beispielsweise im Fall von Antriebsumrichtern, werden zumeist Leistungsmodule verwendet. Dabei werden mehrere miteinander verschaltete Halbleiter durch ein gemeinsames Gehäuse geschützt. Der Aufbau wird in der Regel in ein Plastikgehäuse integriert, das mit elektrisch isolierendem Silikongel gefüllt ist.[2]

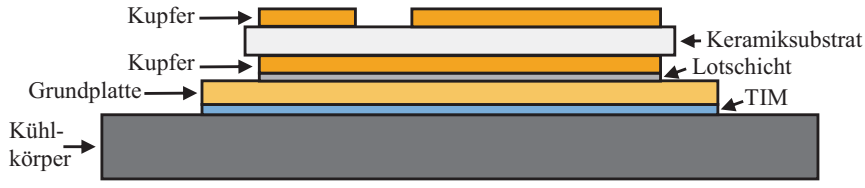

Abb. 18.1 Schematischer Aufbau eines beispielhaften Leistungsmoduls

[1] Vgl. Broughton et al. 2018.

[2] Vgl. Finis 2005; Vgl. Yang et al. 2013.

Chip-Anbindung
Um den Halbleiterchip elektrisch kontaktieren zu können, müssen die Anschlüsse aus dem Gehäuse herausgeführt werden. Dabei bilden das Löten, das Sintern und das Drahtbonden drei wichtige Technologien. Beim Löten werden zwei metallische Werkstoffe über ein Füllmetall miteinander verbunden. Dieses Füllmetall dringt in die Oberfläche der zu verbindenden Werkstoffe ein und bildet eine Legierung, die die elektrische Verbindung sicherstellt.[3] Über eine Lotschicht wird beispielsweise häufig die Unterseite des Chips kontaktiert. Alternativ erfolgt die Kontaktierung der Chipunterseite durch Sintern – ein Verfahren, bei dem die Kontaktflächen über ein metallisches oder keramisches Pulver mit Hilfe von Zeit, Temperatur und gegebenenfalls Druck verbunden werden.[4] Das Drahtbonden wiederum kommt bei der Kontaktierung der Oberseite des Chips zur Anwendung. Die Kontaktflächen werden dabei mittels kleiner Drähte aus Kupfer oder Aluminium – sogenannte Bonddrähte – verbunden.[5] Um die Stromtragfähigkeit zu erhöhen, können mehrere Bonddrähte parallelgeschaltet werden.

Isolationsmaterial
Um den Kühlkörper elektrisch von den stromführenden Komponenten zu isolieren, wird bei leistungselektronischen Modulen in der Regel ein keramisches Substrat verwendet. Keramik eignet sich besonders, da es sowohl eine hohe elektrische Isolationsfestigkeit als auch einen vergleichsweise niedrigen thermischen Widerstand besitzt. So kann die durch Verluste im Halbleiter generierte Wärme über das Substrat an den Kühlkörper weitergegeben werden. Auf der Oberseite des Substrats befindet sich eine Metallschicht, die die elektrische Kontaktierung des Halbleiters ermöglicht. Eine weitere Metallschicht auf der Unterseite des Substrats verbessert die Wärmeverteilung und ermöglicht eine Verbindung mit der Grundplatte.[6]

Kühlanbindung
Unterhalb des Substrats wird häufig eine Grundplatte aus Kupfer oder Aluminium angebracht.[7] Sie sorgt für eine Erhöhung der effektiven Wärmeabgabe, da sich durch die hohe thermische Leitfähigkeit des Kupfers ein lateraler Wärmefluss ergibt.[8] So kann die gesamte Fläche des Kühlkörpers (siehe Abschn. 18.2) für die Wärmeabgabe an die Umgebung genutzt werden. Teilweise wird auf eine Grundplatte verzichtet und das Substrat direkt gekühlt. Dies reduziert die Anzahl der Materialübergänge und somit den thermischen Widerstand.[9]

[3] Vgl. Vianco 2019.
[4] Vgl. Beiss 2013.
[5] Vgl. Ding et al. 2006.
[6] Vgl. Broughton et al. 2018.
[7] Vgl. Broughton et al. 2018.
[8] Vgl. Becker 2015.
[9] Vgl. Broughton et al. 2018.

Sensorik

Im Leistungsmodul integrierte oder externe Sensoren können Ströme und Temperaturen messen, um unter anderem das Modul vor Überlast zu schützen oder Messwerte für einen Regelalgorithmus zu extrahieren. Eine kostengünstige und robuste Methode, den Strom zu messen, besteht darin, den Strompfad zu trennen und einen sogenannten Shunt-Widerstand einzufügen. Als Nachteile des Shunt-Widerstands gelten die große benötigte Fläche auf dem DCB, die notwendige galvanische Isolierung zwischen den leistungsführenden Komponenten und der Messschaltung sowie die im Widerstand umgesetzten Verluste, die das Bauteil auch bei kleinen Strömen aufheizen.[10] Ist eine galvanisch isolierte Strommessung etwa aufgrund von hohen Strömen oder Spannungen gewünscht, kommen beispielsweise Hall-Sensoren und Stromtransformatoren zum Einsatz.[11] In vielen Leistungsmodulen sind Widerstände mit einem negativen Temperaturkoeffizienten (NTC) als Temperatursensoren integriert, da sie kostengünstig sind und sich mit einer einfachen Messschaltung auswerten lassen. Allerdings können Temperaturen nur mit einer geringen Bandbreite gemessen werden, so dass eine Detektionsmessung transienter Vorgänge, zum Beispiel bei kurzzeitigen Überlastungen, nicht möglich ist.[12] Für eine Temperaturmessung mit höherer Bandbreite eignet sich die Auswertung temperatursensitiver elektrischer Parameter (TSEP). Dabei werden temperaturabhängige Eigenschaften des Halbleiters verwendet, für deren Bestimmung lediglich Strom- und/oder Spannungsmessungen benötigt werden – zum Beispiel die Schwellenspannung oder die Drain-Source-Spannung eines MOSFETs. Bei der Auswertung muss jedoch darauf geachtet werden, dass die betrachtete Größe häufig nicht nur temperatur-, sondern auch alterungsabhängig ist.[13]

Parallelisierung

Um die Stromtragfähigkeit zu erhöhen, können Leistungshalbleiter parallelisiert werden. Dies kann in Form von parallelgeschalteten Chips innerhalb eines Moduls sowie in Form von parallelgeschalteten Modulen erfolgen. Aufgrund von beispielsweise Fertigungstoleranzen, Inhomogenität der Dotierung oder Alterung weisen die Bauteile jedoch Unterschiede etwa in der Schwellenspannung, der Vorwärtsspannung oder den parasitären Komponenten auf. Dies führt dazu, dass sich der Strom und damit auch die Verluste in der Realität nicht gleichmäßig aufteilen. Die Schaltung sollte deshalb so ausgelegt werden, dass der jeweilige Bauteilstrom trotz der Bauteilvariation unterhalb des im Datenblatt angegebenen Maximalstroms liegt.[14]

[10] Vgl. Ripka 2010.

[11] Vgl. Ripka 2019.

[12] Vgl. Kalker et al. 2021.

[13] Vgl. Avenas et al. 2012.

[14] Vgl. Lüdecke et al. 2020.

18.2 Kühlung

Die in Form von Wärme auftretende Verlustleistung muss mit einem möglichst hohen Wirkungsgrad an die Umgebung abgegeben werden, da die Sperrschichttemperatur der verwendeten Halbleiter die physikalische Variable ist, die Wirkungsgrad, Leistungsdichte und Zuverlässigkeit am stärksten beeinflusst. Das Überschreiten der maximalen Sperrschichttemperatur kann zu einem sofortigen Ausfall des Bauteils führen.[15]

Zur Abführung der Wärmeenergie an die Umgebung kommen Kühlkörper zum Einsatz, die mit den Modulen thermisch verbunden werden. Als Kühlmittel wird in der Regel die Umgebungsluft oder eine Kühlflüssigkeit verwendet.

Thermal Interface

Bei der Verbindung des Leistungsmoduls mit dem Kühlkörper entstehen Leerstellen, da selbst polierte Oberflächen nicht ideal glatt sind. Derartige Lufteinschlüsse erhöhen den thermischen Widerstand zwischen Halbleiter und Kühlkörper und führen somit zu einer verringerten Wärmeabfuhr. Zur Verbesserung der thermischen Anbindung wird daher ein „Thermal Interface Material" (TIM) zwischen der Grundplatte und dem Kühlkörper eingesetzt.[16] Häufig verwendete TIM sind thermische Fette auf Polymerbasis mit keramischem oder metallischem Füllstoff, Gele aus Silikonen mit eingebetteten Keramik- oder Metallpartikeln sowie „Phase Change Material" (PCM). PCM sind bei Raumtemperatur fest und deshalb einfach aufzutragen. Bei Werten unterhalb der Betriebstemperatur der Halbleiter schmilzt das Material und füllt die Leerstellen, so dass die thermische Leitfähigkeit verbessert wird.[17] Das „Thermal Interface Material" ist die größte Limitierung bei der Reduktion des thermischen Widerstands. Aus diesem Grund werden mitunter Module mit direkt gekühltem Substrat verwendet.[18]

Luftkühlung

Dient die Umgebungsluft als Kühlmedium, wird zwischen der natürlichen und der forcierten Luftkühlung unterschieden. Bei der natürlichen Luftkühlung ist das Kühlmedium in Bezug auf den Kühlkörper ruhend.[19] Die natürliche Luftkühlung kommt überwiegend bei kleinen Leistungen zum Einsatz. Um die Wärmeabgabe zu verbessern, zirkuliert die Umgebungsluft bei der forcierten Luftkühlung, zum Beispiel durch die Verwendung eines Lüfters. Aufgrund des dadurch verbesserten Wärmeübergangs zwischen Kühlkörper und Umgebungsluft ist die Wahl eines kompakteren Kühlkörpers möglich.

[15] Vgl. Kuprat et al. 2021.
[16] Vgl. Sewergin 2021.
[17] Vgl. Broughton et al. 2018.
[18] Vgl. Broughton et al. 2018.
[19] Vgl. Specovius 2013.

Wasserkühlung
Durch die Verwendung eines flüssigen Kühlmediums lässt sich die Größe des Kühlkörpers weiter reduzieren, da der thermische Widerstand zwischen Kühlkörper und Kühlmedium um 80 bis 90 % kleiner ist als bei der forcierten Luftkühlung.[20] Aus diesem Grund eignet sich die Wasserkühlung für Anwendungen mit hohen Leistungen und wird häufig im Bereich der Elektromobilität verwendet.[21] Besonders effektiv sind Kühlkörper, die derart geformt sind, dass es zu einer turbulenten Strömung kommt, da sie die Wärmeübertragung gegenüber einer laminaren Strömung verbessert.[22] Wird ein elektrisch leitfähiges Kühlmedium verwendet, muss der Kühlkreislauf vollständig leckfrei und von spannungsführenden Komponenten galvanisch getrennt sein.

18.3 Passive Bauelemente

Passive Bauelemente wie Kondensatoren, Induktivitäten und Transformatoren bilden essenzielle Komponenten in fast allen leistungselektronischen Systemen. Je nach Anwendung stehen verschiedene Bauteile mit unterschiedlichen Bauformen und Materialien zur Verfügung, aus denen sorgfältig ausgewählt werden muss. Es folgt daher ein kurzer Überblick zu den wichtigsten Ausführungsformen sowie zu deren Eigenschaften und Einsatzgebieten.

18.3.1 Kondensatoren

Kondensatoren sind in der Leistungselektronik unverzichtbar und werden unter anderem in Filtern, im DC-Zwischenkreis und in Snubber-Schaltungen eingesetzt. Je nach Anwendung und Anforderungen kommen dabei verschiedene Materialien und Bauformen infrage.

Eine Form von Kondensatoren in der Leistungselektronik sind Elektrolytkondensatoren. Sie unterscheiden sich durch das verwendete Elektrodenmaterial – etwa Aluminium, Tantal oder Niob – und den Elektrolyten, der flüssig oder fest sein kann. Elektrolytkondensatoren sind in der Regel polarisiert, wodurch die Einbaurichtung relevant ist. Aufgrund des relativ hohen äquivalenten Serienwiderstands werden Elektrolytkondensatoren heutzutage vor allem bei Hochfrequenzanwendungen häufig durch andere Kondensatortypen ersetzt. Darüber hinaus haben Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyten aufgrund des kontinuierlichen Elektrolytverlustes, zum Beispiel durch Austrocknung, meist eine kürzere Lebensdauer als andere Varianten. Aufgrund ihrer hohen Kapazitätsdichte und geringer Kosten finden sie jedoch weiterhin Anwendung.[23]

[20] Vgl. Kang 2012.
[21] Vgl. Broughton et al. 2018.
[22] Vgl. ir. Tijs Van Oevelen.
[23] Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

In Folienkondensatoren besteht das Dielektrikum aus Kunststofffolie. Die Elektroden werden entweder durch eine Metallfolie oder durch eine auf das Dielektrikum aufgebrachte Metallisierung gebildet. Wird eine metallisierte Kunststofffolie verwendet, weisen Folienkondensatoren selbstheilende Eigenschaften auf, was ihre Lebensdauer deutlich erhöht. Im Gegensatz zu Elektrolytkondensatoren sind Folienkondensatoren nicht polarisiert. Aufgrund der hohen Kapazitätsstabilität, der langen Lebensdauer sowie der potenziell hohen Spannungsfestigkeit eignen sie sich sehr gut für den Einsatz als Zwischenkreiskondensatoren und für Snubber-Schaltungen.[24,25]

Keramikkondensatoren verwenden im Gegensatz zu den eben genannten Beispielen Keramik als Dielektrikum. Wie Folienkondensatoren, sind auch Keramikkondensatoren üblicherweise nicht polarisiert. Sie sind heutzutage in der Regel aus mehreren Schichten aufgebaut und werden in diesem Fall als „Multilayer Ceramic Capacitor“ (MLCC) bezeichnet. Je nach verwendeter Keramik werden Kondensatoren in vier Klassen eingeteilt, wobei derzeit nur noch die Klassen 1 und 2 relevant sind. Kondensatoren der Klasse 1 – zum Beispiel NP0/C0G – weisen eine lineare Temperaturabhängigkeit, einen hohen Isolationswiderstand und eine geringe Selbstentladung auf, erreichen aber aufgrund der niedrigen Permittivität nur geringe Kapazitätswerte. Im Gegensatz dazu erreichen Klasse-2-Kondensatoren wie X7R höhere Kapazitätswerte, bringen aber gleichzeitig höhere Toleranzen, höhere Verluste und eine nicht lineare Temperaturabhängigkeit mit sich. Neben linearen (Klasse 1) und ferroelektrischen (Klasse 2) sind in den vergangenen Jahren auch Kondensatoren mit antiferroelektrischen Keramiken aufgekommen, die sich besonders für leistungselektronische Anwendungen eignen. Aufgrund der stark nicht linearen Spannungsabhängigkeit kann der Kapazitätswert bei der gewünschten Nennspannung deutlich höher liegen als bei geringen Spannungen. Sie können daher beispielsweise als Zwischenkreiskondensatoren verwendet werden.[26]

18.3.2 Magnetika

Neben Kondensatoren sind auch Magnetika, beispielsweise Induktivitäten und Transformatoren, essenziell für die meisten leistungselektronischen Systeme. Auch Magnetika müssen individuell für die vorgesehenen Anwendungen ausgewählt und ausgelegt werden. Dafür stehen verschiedene Magnetkernformen und -materialien sowie unterschiedliche elektrische Leiter zur Verfügung.

Die Leiterwicklungen der Magnetika werden entweder als Luftspulen oder um einen Kern gewickelt. Zu den bekanntesten Kernformen gehören Toroid, zylindrischer Stab, I-, U- oder E-Kern sowie Topf- oder Planarkerne. Je nach Anforderung können in geeigneten Kernen Luftspalte eingearbeitet werden, um die effektive Permeabilität und das Sättigungs-

[24] Vgl. Ramos 2018.

[25] Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

[26] Vgl. Wang und Blaabjerg 2014.

verhalten zu beeinflussen. Zu den gängigsten Kernmaterialien gehören Ferrite, Eisen oder Eisenlegierungen sowie amorphe und nanokristalline Legierungen. Die Kernmaterialien werden zu einem Kern in Form von Vollmaterial, laminierten Platten oder Pulver verarbeitet. Die Auswahl der Kernform, des Materials und der Verarbeitungsform des Materials beeinflusst die Größe, das Gewicht, die Verluste, das Sättigungsverhalten und die Kosten der magnetischen Komponenten und muss daher sorgfältig vorgenommen werden.[27,28]

Für die Wicklungen werden elektrische Leiter in Form von Volldraht, Litzen und Metallfolien verwendet. Die Optionen unterscheiden sich in Bezug auf Kosten, Platzbedarf und den geeigneten Frequenzbereich. Volldraht ist in der Regel kostengünstiger in der Anschaffung, jedoch aufgrund der erhöhten Skin-Effekt-Verluste bei höheren Frequenzen den Litzen unterlegen. Kupferfolie kann insbesondere bei leistungselektronischen Anwendungen mit Frequenzen von mehreren hundert Kilohertz vorteilhaft gegenüber Litze sein. Sie ist kostengünstiger in der Anschaffung und ermöglicht außerdem Magnetika mit niedrigen Verlusten in einem weiten Frequenzbereich und geringerem Kupferbedarf.[29] In Abb. 18.2 ist beispielhaft eine Induktivität mit Kupferfolie, Planarkern und 3-D-gedruckten Wickelkörpern zu sehen.[30,31]

18.4 Treiberschaltung

In leistungselektronischen Applikationen werden die Halbleiterschalter – wie MOSFET oder IGBT – in Abhängigkeit von Signalen der übergeordneten Controller-Einheit ein- und ausgeschaltet, um die gewünschte Spannung am Ausgang des Umrichters zu stellen. Zum Ein- und Ausschalten muss ein Spannungslevel oberhalb beziehungsweise unterhalb der Schwellspannung an den Gate-Kontakt des Halbleiterschalters angelegt werden, zum Beispiel 15 V für den eingeschalteten und -10 V für den ausgeschalteten Zustand in typischen IGBT-Anwendungen. Während des Wechsels dieser beiden Zustände werden jedoch kurzzeitige hohe Ströme benötigt, um parasitäre Kapazitäten der leistungselektronischen Schalter schnell umladen zu können. Da die übergeordnete Controller-Einheit – etwa Mikrocontroller oder FPGA – weder solch hohe Ströme noch die erforderlichen Spannungslevel liefern kann, wird eine sogenannte Treiberschaltung – auch als „Gate-Treiberschaltung" bekannt – benötigt, die die Steuersignale der Controller-Einheit verstärkt und ein möglichst schnelles Umschalten gewährleistet.

Der wesentliche Aufbau einer typischen Treiberschaltung ist in Abb. 18.3 dargestellt. Das Kernelement bildet ein Gate-Treiber-IC (häufig eine Push-Pull-Stufe), der das

[27] Vgl. McLyman 2004.

[28] Vgl. van den Bossche und Valchev 2018.

[29] Vgl. Wienhausen 2019.

[30] Vgl. McLyman 2004.

[31] Vgl. van den Bossche und Valchev 2018.

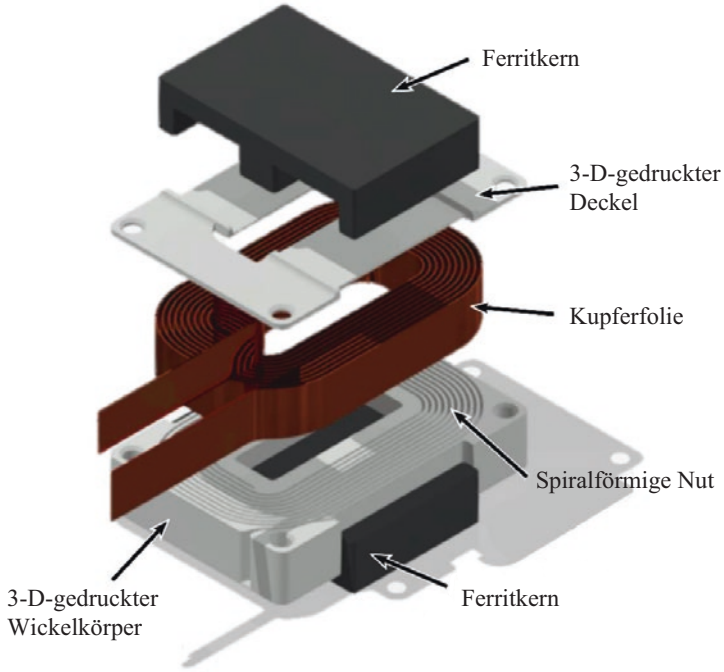

Abb. 18.2 Beispielhafter Aufbau einer Leistungsinduktivität mit Kupferfolie, 3-D-gedrucktem Wickelkörper und planarem Ferritkern. (vgl. Wienhausen 2019)

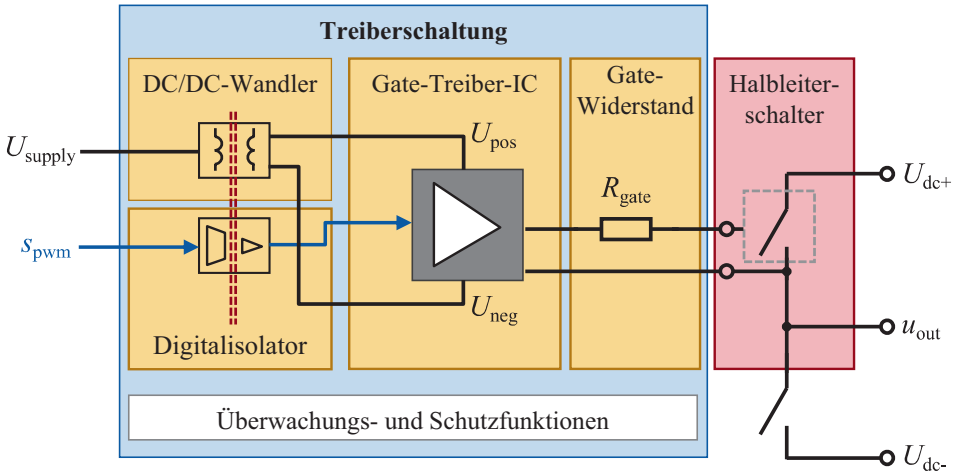

Abb. 18.3 Schematische Darstellung der Bausteine und Funktionen einer typischen Treiberschaltung

Steuerungssignal s_{pwm} der übergeordneten Controllereinheit als Input erhält und in Abhängigkeit von diesem Signal entweder das positive oder das negative Spannungslevel an das Gate des leistungselektronischen Schalters anlegt.[32] Zur Generierung der Versorgungsspannungen U_{pos} und U_{neg} werden normalerweise galvanisch isolierte DC/DC-Wandler verwendet – zum Beispiel Sperrwandler. Die galvanische Isolierung ist in zahlreichen Applikationen erforderlich, um eine Trennung der Niedervolt- und Hochvoltelektronik zu gewährleisten und Sicherheitsstandards zu erfüllen. Aus demselben Grund wird das Steuerungssignal über einen Digitalisolator an den Verstärker-IC übertragen. Ein weiterer wichtiger Bestandteil einer Treiberschaltung ist der Gate-Widerstand, über dessen Dimensionierung sich die Dauer der Umschaltvorgänge bestimmen lässt. Grundsätzlich ist es vorteilhaft, möglichst schnell zu schalten, also geringe Gate-Widerstände zu verwenden, um die Schaltverluste der Halbleiterschalter geringzuhalten. Jedoch steigt mit sinkendem Gate-Widerstand die Steilheit der Spannungs- und Stromflanken am Ausgang des Umrichters – insbesondere bei Umrichtern mit schnellschaltenden Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliziumcarbid.[33] Da steile Spannungs- und Stromflanken zu einer starken Belastung passiver Komponenten – etwa des Zwischenkreiskondensators – sowie der elektrischen Maschine führen und die elektromagnetische Verträglichkeit des leistungselektronischen Systems beeinträchtigen können, muss die Steilheit dieser Flanken durch eine geeignete Dimensionierung des Gate-Widerstandes limitiert werden.[34]

Um einen sicheren Betrieb des leistungselektronischen Systems zu gewährleisten und kritische Zustände zu erkennen, sind Treiberschaltungen mit Überwachungs- und Schutzfunktionen ausgestattet. Dazu zählt insbesondere die Detektion von Kurzschlüssen, die nicht nur die leistungselektronischen Halbleiterschalter, sondern auch die angeschlossene Last – etwa eine elektrische Maschine – schädigen können. Ein weitverbreitetes Konzept für eine solche Detektion ist eine sogenannte Desaturierungserkennung (auch DESAT-Erkennung), die in der Lage ist, innerhalb kurzer Zeit sowohl Halbbrücken- als auch Lastkurzschlüsse zu detektieren, um in einem solchen Fall den Umrichter in einen sicheren Zustand zu überführen und somit die Leistungshalbleiter vor einer Beschädigung zu schützen. Eine weitere wichtige Funktion von Treiberschaltungen ist der Schutz vor parasitärem Einschalten der Halbleiterschalter, was zum Beispiel aus elektromagnetischen Störungen oder steilen Spannungsflanken des Umrichters resultieren kann. Um eine hohe Robustheit gegenüber solchen Störeinflüssen zu erzielen, werden üblicherweise negative Ausschaltspannungslevel mit einem hinreichenden Abstand zur Schwellspannung oder eine sogenannte aktive Miller-Clamp-Funktionalität verwendet.[35]

Neben diesen Grundfunktionalitäten bieten fortschrittliche, intelligente Treiberschaltungen die Möglichkeit, den Betrieb von Umrichtern weiter zu optimieren.[36] Durch

[32] Vgl. Erickson und Maksimović 2004.

[33] Vgl. Lüdecke et al. 2020.

[34] Vgl. Grau und De Doncker 2019.

[35] Vgl. Wintrich et al. 2015.

[36] Vgl. Henn et al. 2022.

die Gateshaping-Technik lassen sich beispielsweise die Lade- und Entladevorgänge des Gates so modifizieren, dass Spannungs- und Stromverläufe mit optimaler Effizienz bei geringen elektromagnetischen Störaussendungen generiert werden.[37] Darüber hinaus ermöglichen Treiberschaltungen mit zusätzlicher Sensorik eine präzise Zustandsüberwachung der Leistungshalbleiter, indem sie deren Temperatur – basierend auf temperatursensitiven elektrischen oder optischen Parametern – hochdynamisch messen.[38]

18.5 Produktionsumgebung und ESD-Schutz

Die Potenzialdifferenz zwischen einem Menschen und seiner Umgebung kann aufgrund des triboelektrischen Effekts bis zu 15 kV betragen.[39] Um leistungselektronische Bauteile vor einer elektrostatischen Entladung (ESD) zu schützen, die zum Beispiel zu einer Zerstörung des Gate-Oxids führen kann, sind im Zuge der Fertigung Schutzmaßnahmen einzuhalten. Diese umfassen unter anderem die Verwendung von ESD-Bekleidung sowie das Arbeiten an ESD-Arbeitsplätzen. Auch die Verpackungen sollten einen ESD-Schutz aufweisen, um entsprechende Schäden während des Transports zu verhindern.[40]

Literatur

Teil III: Produktion von elektrofahrzeugspezifischen Systemen

Avenas, Y; Dupont, L; Khatir, Z.: *Temperature Measurement of Power Semiconductor Devices by Thermo-Sensitive Electrical Parameters – A Review*. In: IEEE Trans. Power Electron., Jg. 27, 2012, Nr. 6, S. 3081–3092

Becker, M.: *Neue Technologien für hochzuverlässige Aufbau- und Verbindungstechniken leistungselektronischer Bauteile*. Chemnitz: Universitätsbibliothek Chemnitz, 2015

Beiss, P.: *Pulvermetallurgische Fertigungstechnik.* 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

Broughton, J; Smet, V; Tummala, R. R; Joshi, Y. K.: *Review of Thermal Packaging Technologies for Automotive Power Electronics for Traction Purposes*. In: Journal of Electronic Packaging, Jg. 140, 2018, Nr. 4

Ding, Y; Kim, J.-K; Tong, P.: *Numerical analysis of ultrasonic wire bonding: Effects of bonding parameters on contact pressure and frictional energy*. In: Mechanics of Materials, Jg. 38, 2006, Nr. 1–2Nr., S. 11–24

Engelmann, G.: *Reducing device stress and switching losses using active gate drivers and improved switching cell design*: RWTH Aachen University, 2018

Erickson, R. W; Maksimović, D.: *Fundamentals of power electronics.* 2. Aufl. Norwell, Mass.: Kluwer Acad. Publ, 2004

[37] Vgl. Engelmann 2018.

[38] Vgl. van der Broeck 2019; Vgl. Kalker et al. 2021.

[39] Vgl. Kugler et al.

[40] Vgl. Kampker et al. 2018.

Finis, G.: *Das Verhalten von Silikongel unter hohen elektrischen Feldstärken*: Universität Kassel, 2005

Grau, V; De Doncker, R. W.: *The Effects of Steep Voltage Slopes on Insulation Systems of Coil Windings caused by Next Generation Power Semiconductor Devices*: IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2019, S. 26–29

Henn, J; Ludecke, C; Laumen, M; Beushausen, S; Kalker, S; van der Broeck, C. H; Engelmann, G; Doncker, R. W. de:*Intelligent Gate Drivers for Future Power Converters*. In: IEEE Trans. Power Electron., Jg. 37, 2022, Nr. 3, S. 3484–3503

Van Oevelen, T.: *Optimal Heat Sink Design for Liquid Cooling of Electronics*: KU Leuven, 2014

Kalker, S; Ruppert, L. A; van der Broeck, C. H; Kuprat, J; Andresen, M; Polom, T. A; Liserre, M; de Doncker, R. W.: *Reviewing Thermal Monitoring Techniques for Smart Power Modules*. In: IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021, S. 1

Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Hrsg.): *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie.* 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018

Kang, S. S.: *Advanced cooling for power electronics, In: 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (cips). IEEE, 2012. S.1-8.*

Kugler, F; Albach, M; Schuh, S; Kuebrich, D.: *ESD laboratory for power electronics students*: 2005 IEEE 11th European Conference on Power Electronics and Applications

Kuprat, J; van der Broeck, C. H; Andresen, M; Kalker, S; Doncker, R. W. de; Liserre, M.: *Research on Active Thermal Control: Actual Status and Future Trends Special Issue Commemorating 40 years of WEMPEC, 2021*. In: IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2021, S. 1

Lüdecke, C.: *Compensating asymmetries of parallel-connected SiC MOSFETs using intelligent gate drivers:* RWTH Aachen University, 2022

McLyman, C. W. T.: *Transformer and Inductor Design Handbook*: CRC Press, 2004

Ramos, R.: *Film Capacitors in Power Applications: Choices and Particular Characteristics Needed*. In: IEEE Power Electron. Mag. 2018, Nr. 5, S. 45–50

Ripka, P.: *Electric current sensors: a review*. In: Meas. Sci. Technol., Jg. 21, 2010, Nr. 11, S. 112001

Ripka, P.: *Contactless measurement of electric current using magnetic sensors*. In: tm – Technisches Messen, Jg. 86, 2019, Nr. 10, S. 586–598

Sewergin, A.: *Design challenges and solutions for the practical application of SiC power modules exemplified by an automotive dc-dc converter*: RWTH Aachen University, 2021

Specovius, J.: *Grundkurs Leistungselektronik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013

van den Bossche, A; Valchev, V. C.: *Inductors and Transformers for Power Electronics.* 1. Aufl.: CRC Press, 2018

van der Broeck, C. H.: *Verfahren zur thermischen Modellierung, Überwachung und Regelung von Leistungsmodulen*: RWTH Aachen University, 2019

Vianco, P. T.: *A Review of Interface Microstructures in Electronic Packaging Applications: Soldering Technology*. In: JOM, Jg. 71, 2019, Nr. 1, S. 158–177

Wang, H; Blaabjerg, F.: *Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview*. In: IEEE Trans. on Ind. Applicat. 2014, Nr. 50, S. 3569–3578

Wienhausen, A. H.: *High integration of power electronic converters enabled by 3D printing*: RWTH Aachen University, 2019

Wintrich, A; Nicolai, U; Tursky, W; Reimann, T. (Hrsg.): *Applikationshandbuch Leistungshalbleiter.* 2., überarbeitete Aufl., Ilmenau: ISLE Verlag, 2015

Yang, L; Agyakwa, P. A; Johnson, C. M.: *Physics-of-Failure Lifetime Prediction Models for Wire Bond Interconnects in Power Electronic Modules*. In: IEEE Trans. Device Mater. Relib., Jg. 13, 2013, Nr. 1, S. 9–17

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

