

1 Einleitung

Leistungselektronische Systeme dienen der Umformung elektrischer Energie und müssen den entsprechenden elektrischen Anforderungen aber auch den äußeren nicht elektrischen Randbedingungen genügen. Die Anwendungsfelder sind vielfältig und erstrecken sich von elektronischen Kleingeräten und Netzteilen mit geringen Leistungen über Frequenzumrichter für Industrie-, Traktions- sowie Großantriebe bis hin zu Anlagen der Energieerzeugung und -übertragung im Gigawatt-Bereich. Durch die voranschreitende Elektrifizierung kommen Einsatzgebiete hinzu, bei denen die bisherigen Standardkomponenten aufgrund der erhöhten Anforderungen an ihre Grenzen stoßen.

1.1 Erhöhte Anforderungen in der Leistungselektronik

Neben einer bedarfsgerechten Funktion sollen die leistungselektronischen Systeme in der Regel effizient, wartungsarm und während des Betriebes sowie in der Anschaffung kostengünstig sein. Bei den Komponenten haben sich bezüglich der Einsatzbedingungen gewisse Standards durchgesetzt, so dass z. B. in thermischer Hinsicht nahezu sämtliche Komponenten der Leistungselektronik einen Betriebstemperaturbereich von -20°C bis 85°C abdecken. Im Bereich der Leistungshalbleitermodule sind maximale zulässige Sperrschichttemperaturen bis 150°C typisch, wobei neueste Generationen mit bis zu 175°C spezifiziert sind. Die Verlustleistung der Komponenten, deren Kühlung sowie die Randbedingungen im Systemaufbau und der Umgebung definieren die resultierenden Bauelementtemperaturen und die davon abhängige Lebensdauer.

In Systemen, die möglichst effizient, klein, leicht und robust sein sollen oder besonderen Umgebungsbedingungen, wie hohen Temperaturen standhalten müssen, unterliegen die Bauteile und Komponenten teilweise extremen Belastungen. Die elektrischen, thermischen, mechanischen oder auch chemischen Belastungen können dazu führen, dass Standardbauelemente diesen Anforderungen nicht mehr gerecht werden können.

Die am Markt erhältlichen Leistungshalbleiter unterscheiden sich in ihrer Bauelementstruktur, ihrem Verhalten, ggfs. dem benötigten Treiberaufwand und auch dem Bauelementgehäuse. Eine Auswahl erfolgt über die Spannungsklasse und die Stromtragfähigkeit sowie den Halbleitereigenschaften, wobei auch Systemaspekte Einfluss auf die Wahl der Komponenten nehmen. Berücksichtigt werden im Wesentlichen Aspekte oder Restriktionen der Kategorien

- Leistungsdaten (Sperrspannung, Stromtragfähigkeit, etc.)
- Effizienz (Verluste, Wirkungsgrad, Taktfrequenz, etc.)
- Aufbau (Bauvolumen, Gewicht, Leistungsdichte, etc.)
- Robustheit (Temperatur, Lebensdauer, EMV, Zuverlässigkeit, etc.)
- Wirtschaftlichkeit (Kosten, Wartung, Verfügbarkeit, etc.).

Die Gewichtung der teilweise korrelierenden Kriterien erfolgt auf die jeweiligen Einsatzbedingungen angepasst. Jedoch besteht aus ökonomischen Gründen ein gleichzeitiger Wunsch nach effizienteren, kompakteren und robusteren Systemen.

1.2 Ansätze für effizientere, kompaktere und robustere Systeme

Während des Betriebes der Leistungshalbleiter sind sowohl die stationären Zustände als auch die dynamischen Vorgänge nicht ideal, sondern verlustbehaftet. Gerade bei größeren umzuformenden Leistungen muss die Abfuhr der in Wärme umgesetzten Verluste sichergestellt sein. Um obige Forderungen erreichen zu können, müssen als Voraussetzung die Halbleitermodule bedarfsgerecht ausgewählt, ein kompaktes Schaltungslayout angestrebt und möglichst kompakte Elektronikkomponenten eingesetzt werden. Das Gehäuse der Leistungshalbleiter sollte eine gute Wärmeanbindung besitzen und ebenfalls die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen erfüllen können. Um darüber hinaus effizientere, kompaktere und robustere Systeme realisieren zu können, dienen folgende Ansätze.

1. **Optimierung der Kühlung.** Kann die im Bauteil umgesetzte Verlustwärme nicht abgeführt werden, steigt dessen Temperatur so weit an, bis sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt oder es zur Zerstörung des Bauteils kommt. Durch optimierte Kühlpfade und -technologien können die abführbare Verlustleistung gesteigert und das Bauvolumen minimiert werden.

2. **Effizientere Leistungshalbleiter.** Der Einsatz von effizienten Leistungshalbleitern reduziert die abzuführende Wärmemenge, den Kühlaufwand und den benötigten Bauraum. Trotz fortwährender technologischer Weiterentwicklung der Si-Halbleiter sind materialspezifische Grenzen absehbar, die auch durch Optimierungen innerhalb der Halbleiterstrukturen nicht umgangen werden können. Um darüberhinaus effizientere und robustere Halbleiterbauelemente realisieren zu können, ist der Übergang auf Halbleitermaterialien mit größerem Bandabstand ein aussichtsreicher Ansatz.

3. **Höhere zulässige Bauelementtemperaturen.** Die maximal abführbare Verlustleistung hängt neben der Kühlanbindung auch von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke ab. Je thermisch belastbarer die Halbleiter sind, desto kleiner kann die bereitgestellte Kühlfläche dimensioniert werden. Auch wenn die derzeitige maximale Sperrschichttemperatur aktueller Halbleiter vor allem durch die einhergehenden thermomechanischen Belastungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) begrenzt wird, zeigen die temperaturabhängigen Halbleitereigenschaften eine Grenze auf. Um diese heraufzusetzen, ist ein Übergang auf ein Halbleitermaterial mit größerem Bandabstand ebenfalls vielversprechend.

Welcher der Ansätze für Applikationen mit erhöhten Anforderungen sinnvoll ist, muss individuell abgewogen werden. Doch ist ableitbar, dass für stetig steigende Anforderungen ein Übergang auf ein alternatives Halbleitermaterial für kompaktere, effizientere und robustere Leistungselektroniken sinnvoll erscheint. Hierbei gilt Siliziumkarbid (SiC) als aussichtsreiches Grundmaterial, dass aber aufgrund des jungen Entwicklungsstadiums noch nicht gänzlich erforscht ist.

Um die Verhaltensweisen der neuen SiC-Halbleiterstrukturen identifizieren und mit den aktuellen Si-Halbleitern vergleichen zu können, sollten verfügbare SiC-Prototypen in einem dem Silizium (Si) entsprechendem Gehäuse untergebracht werden (Packaging). Durch Untersuchungen zum statischen und dynamischen Verhalten können die Betriebs- und Verlusteigenschaften bestimmt werden. Bei Berücksichtigung gleicher Untersuchungsparameter wird zusammen mit den sich aus den Systemanforderungen ergebenden Randbedingungen ein Vergleich der Technologien möglich, aus dem das Potenzial für zukünftige Anwendungen abgeleitet werden kann. Die Vorgehensweise bietet neben der Möglichkeit die Ergeb-

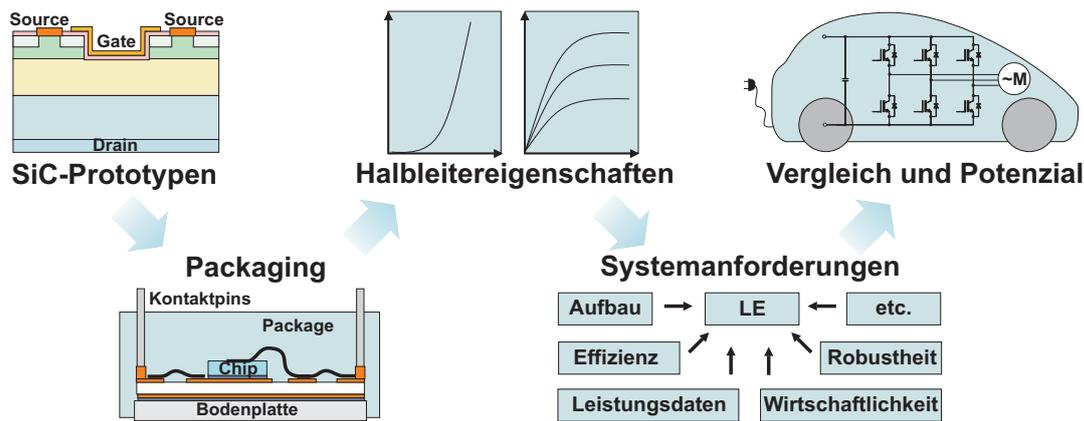


Abbildung 1.1: Vorgehensweise zur Evaluierung neuer Leistungshalbleiter

nisse rekursiv in die Bauelementoptimierung einfließen zu lassen, einen generellen Ansatz zur Evaluierung neuer Leistungshalbleiter (vgl. Abb. 1.1).

1.3 Vorgehensweise

In der vorliegenden Abhandlung werden, nach einer Kurzvorstellung der Anforderungen im Bereich der Elektrotraktion und Photovoltaik, die derzeit hierfür zur Verfügung stehenden Leistungshalbleiterbauelemente erläutert. Zusammen mit deren Aufbau- und Verbindungstechnik, den statischen und dynamischen Verlustmechanismen sowie der Vorstellung effizienter Kühltechnologien spiegelt dies den derzeitigen Stand der Technik wieder. Die Si-Halbleiter werden als Referenz für die SiC-Halbleiterbauelemente verwendet, deren Materialeigenschaften, Halbleiterstrukturen und Forschungsstand im dritten Kapitel vorgestellt werden. Darauf folgen Messergebnisse und Vergleiche zu den Bauelementeeigenschaften von zur Verfügung gestellten Mustern. Die Untersuchungen dienen zur Evaluierung der bei der Halbleiterauslegung angestrebten Eigenschaften und als Vergleich der beiden Technologien. Im anschließenden fünften Kapitel zeigt eine analytische Bestimmung der Gesamtverluste eines SiC-Wechselrichters die vorteiligen Einsatzgebiete im Vergleich zur Si-Referenz und somit das zukünftige Potenzial der Halbleiter. Die im sechsten Kapitel vorgestellten Wechselrichter dienen zur Identifikation der Grenzbereiche, zum Aufzeigen der derzeit bestehenden Kompatibilitätsherausforderungen und der Praxistauglichkeit der Muster. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung und der Ausblick.

2 Stand der Technik

Die beschriebenen erhöhten Anforderungen liegen in den derzeit stark wachsenden Bereichen der elektrischen Antriebstechnik im Automobil oder der Photovoltaik vor. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, werden die Komponentenentwicklungen insbesondere im Bereich der Leistungshalbleiter stark vorangetrieben. Da allerdings die physikalischen Grenzen der bisher eingesetzten Silizium- (Si-) Halbleiter absehbar sind, werden hier auch neue Halbleitermaterialien mit einem größeren Bandabstand (Wide-Band-Gap) wie Siliziumkarbid (SiC) auf ihre Einsatzfähigkeit hin geprüft. Sollte eine verbesserte Performance oder sogar eine Kostenersparnis im Gesamtsystem durch SiC-Leistungshalbleiter möglich werden, könnte dies durch Massenproduktionen zu einer Kostensenkung des teuren Rohmaterials führen und so den Einsatz für weitere Anwendungen ebenfalls wirtschaftlich machen.

Die vorangegangenen Optimierungsansätze zeigen, dass die Leistungshalbleitereigenschaften und deren Kühlung von wesentlicher Bedeutung für effizientere, robustere und kompaktere Systeme sind und daher Entwicklungen neuer Leistungshalbleiter auf Basis von alternativen Halbleitermaterialien weiterführend sein können. Für die Automobilleistungselektronik stehen Robustheit, Kompaktheit, Effizienz und Kosten im Vordergrund, während bei der Photovoltaik in erster Linie möglichst effiziente Systeme benötigt werden. Zur näheren Erläuterung erfolgt eine kurze Beschreibung beider Anwendungen. Da die neuen Halbleitertechnologien zwangsläufig mit den aktuell eingesetzten Leistungshalbleitern konkurrieren, werden darauffolgend die aktuell eingesetzten Leistungshalbleiterbauelemente und Leistungskühltechnologien vorgestellt.

2.1 Anwendungen mit erhöhten Anforderungen

Die den Automobil- und Photovoltaik-Leistungselektroniken zugrundeliegenden Topologien und die darin eingesetzten Leistungshalbleiter sind zentraler Bestandteil beider Einsatzbereiche. Auch wenn die Anforderungen beider Bereiche nicht

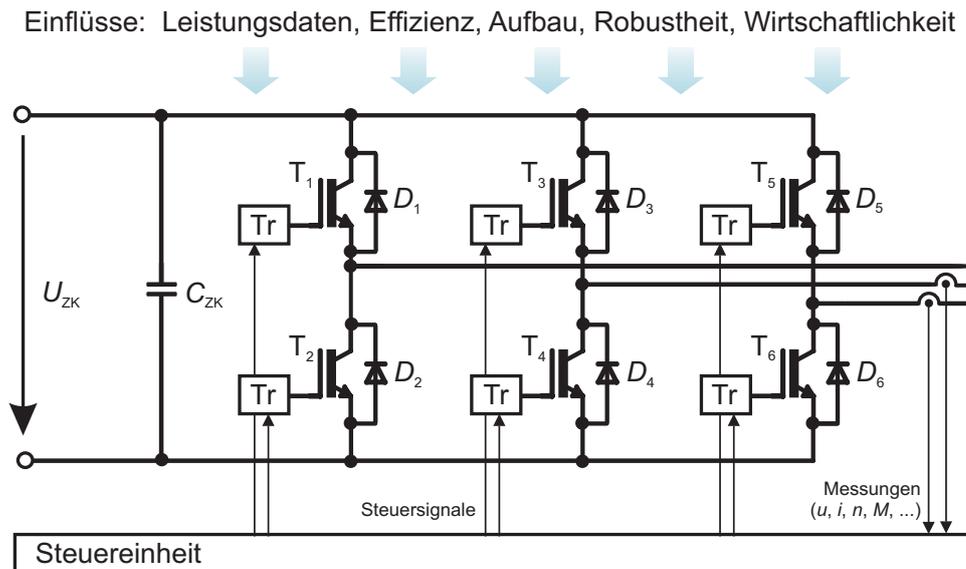


Abbildung 2.1: Dreiphasiger Wechselrichter

identisch sind, versprechen SiC-Leistungshalbleiter für beide Anwendungen Systemvorteile. Im Bereich kleinerer Leistungen finden in der Photovoltaik üblicherweise sogenannte Vier-Quadranten-Steller (4-Q-Steller) mit zwei Halbbrücken Einsatz. Für mittlere und größere Leistungen werden in beiden Anwendungen häufig die klassische dreiphasige Drehstrombrückenschaltung eingesetzt. Abb. 2.1 zeigt diese Topologie, bestehend aus drei Halbbrücken mit jeweils zwei Leistungshalbleiterschaltern (T) und -dioden (D), den Treiberstufen (Tr), einem Zwischenkreiskondensator (C_{ZK}), der Sensorik und der Steuereinheit. Abhängig vom Einbauort unterliegen die Komponenten neben den funktionsbedingten Belastungen auch den äußeren Einflüssen.

Elektro- und Hybridfahrzeuge

Für eine klimaverträgliche und Ressourcen schonende Mobilität gewinnt der Elektroantrieb im Bereich der Straßenfahrzeuge immer mehr an Bedeutung. Durch die Elektrifizierung des Antriebes und der Nutzung von regenerativen Energien sollen sowohl Emissionen und die Abhängigkeit vom Erdöl verringert werden als auch gleichzeitig verbrauchsärmere Fahrzeuge entstehen. Langfristig sind Elektrofahrzeuge (EV) angestrebt, die mittels Batterien oder Brennstoffzellen (BSZ) betrieben und so zumindest für kürzere Distanzen voll elektrisch

genutzt werden können. Allerdings herrscht zwischen dem Technologiestand, insbesondere der Batterien, und den Anforderungen der Fahrzeuge für gewohnte Distanzen eine große Lücke. Eine mittelfristige Lösung ist die Kombination aus konventionellem Verbrennungs- und Elektroantrieb. Die so genannten Hybridfahrzeuge (HEV) ermöglichen die Rückgewinnung der Bremsenergie, eine Effizienzsteigerung beim Verbrennungsmotor sowie der Vermeidung von Leerläufen.

Die elektrischen Fahrzeugantriebe sind nach den zugrunde liegenden Strukturen sowie nach dem Anteil an der Gesamtantriebsleistung klassifiziert. So werden innerhalb der HEV die Strukturen in serielle, parallele, kombinierte und leistungsverzweigte Hybridantriebe unterschieden, wobei Kategorien wie Micro-, Mild-, Fullhybrid und reines Elektrofahrzeug den elektrischen Antriebsleistungsanteil spezifizieren. Je nach Struktur und zur Verfügung stehender Leistung sind verschiedene zusätzliche Funktionen wie Start-Stopp, Rekuperieren, Leerlaufahrt ohne Verbrennungskraftmaschine (VKM) oder voll elektrisches Fahren möglich. Eine Übersicht der Leistungsklassen und möglichen Fahrzeugfunktion in Anlehnung an [Wall, Wöhl, Cand2] gibt Abb. 2.2, wobei für eine detaillierte Beschreibung auf die Literatur verwiesen wird.

Auch wenn sich bei HEV gegenüber EV die thermischen Belastungen der elektrischen Komponenten durch die vorhandene VKM als zusätzliche Wärmequelle verschärfen können, sind die Auslegungskriterien bei beiden Fahrzeugtypen ähnlich. Maßgeblichen Einfluss auf die Dimensionierung bzw. die Auswahl der nötigen Komponenten haben diverse Faktoren wie Antriebsleistung, Drehmoment- und Drehzahl-Charakteristik, Gewicht, Bauvolumen, Umgebungsbedingungen, Kosten, Geräusentwicklung und Lebensdauer. Für die Komponenten der Leistungselektronik (LE), deren Zuverlässigkeit und Lebensdauern sind neben den elektrischen Eigenschaften u. a. die auszuhaltenden Temperaturen und Temperaturhübe sowie die aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten damit einhergehenden mechanischen Belastungen ausschlaggebend.

Um die Herstellungskosten des Antriebes in EV und insbesondere in HEV gering zu halten, werden integrierte Lösungen angestrebt [Mert1]. Hierdurch können z. B. Kabellängen, Halterungen und Kühlanbindungen eingespart und so auch Gewicht und Bauraum reduziert werden. Für die Steigerung der Leistungsdichte und die Reduzierung der Produktionskosten wird versucht, die elektrischen Komponenten des Fahrzeugantriebes nicht mit einem zusätzlichen, sondern mit

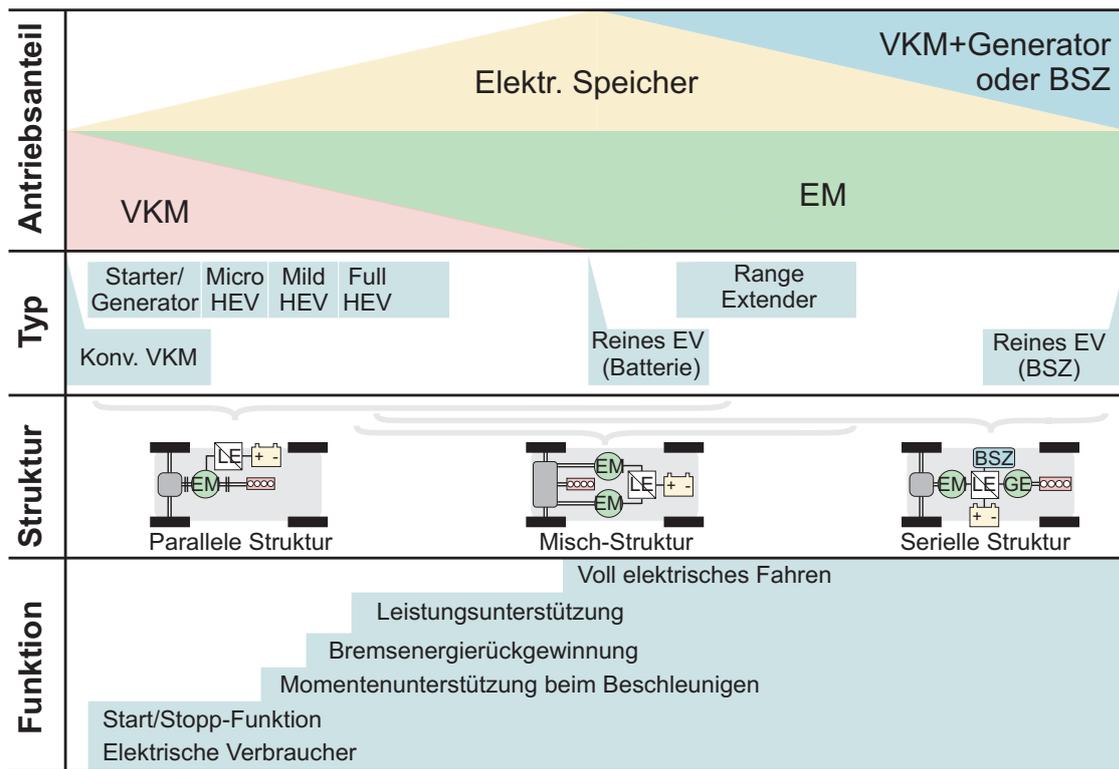


Abbildung 2.2: EV- und HEV-Strukturen

dem vorhandenen Kühlkreislauf der VKM zu kühlen. Durch die hohen Kühlwassertemperaturen von 90-115°C [Mert2] steigen allerdings die Temperaturanforderungen an die Maschine und an die Leistungselektronik, so dass für diesen Bereich spezialisierte Komponenten eingesetzt werden müssen.

Typische Leistungsdichten bei Fahrzeugantrieben mit 20-150 kW liegen für die elektrische Maschine (EM) bei ca. 1-4 kW/kg. Die Leistungsdichte der Leistungselektronik liegt bei etwa 10-20 kW/kg. Allerdings muss für Serienfahrzeuge berücksichtigt werden, welcher Kühl- und Kostenaufwand angemessen ist und welche Lebensdauernanforderungen damit eingehalten werden können.

Abb. 2.3 zeigt als Beispiel einer integrierten Antriebsstranglösung einen Touran-Hybrid-Antriebsstrang mit VKM, EM und LE. Die entwickelte Leistungselektronik ist hochtemperaturfähig, speist eine zwischen Getriebe und VKM sitzende Asynchronmaschine und ist direkt auf dem Motorblock der VKM aufgebracht. Der Kühlkreislauf der VKM erwärmt ebenfalls die EM sowie die LE, deren Komponenten die Anforderungen und Spezifikationen erfüllen.

Um die Anforderungen an die Komponenten für die gesamte Fahrzeuglebens-

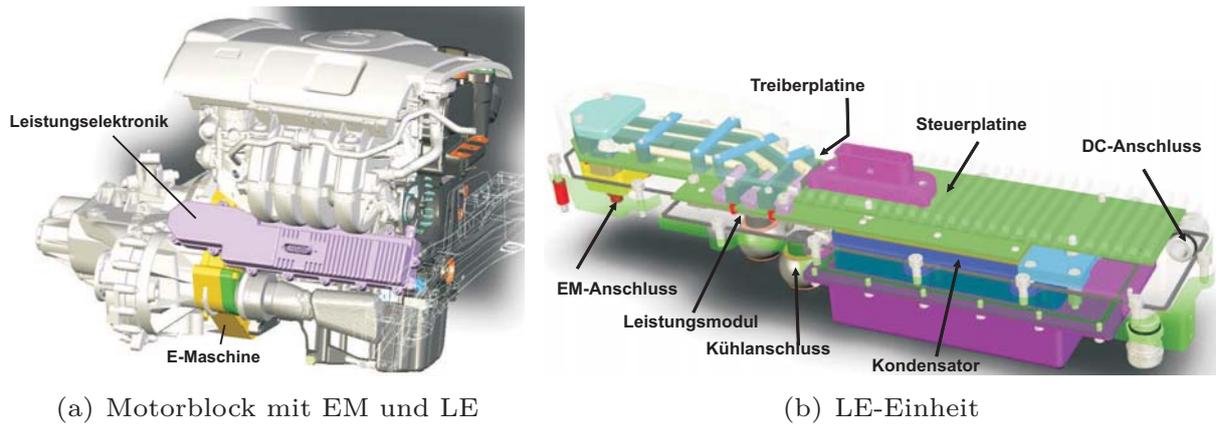


Abbildung 2.3: Integrationslösung für einen VW-Touran [Koch]

dauer abzuschätzen, wird ein repräsentatives Fahrverhalten, der sogenannte Fahrzyklus definiert. Anhand des Fahrzyklusses und anhand der angestrebten Fahrstrategie (zusammen Mission Profile) kann dann das elektrische Profil (aktive Zyklen) der Bauelemente erstellt werden. Die thermischen Einflüsse der VKM spiegeln zusammen mit den Umgebungsbedingungen die klimatischen Einsatzbedingungen (passive Zyklen) wieder. Daraus können bei definierter Kühlung das elektrische, thermische und mechanische Belastungsprofil abgeleitet werden. Anhand von statistischen Ausfalldaten aus Lastwechsel- und Temperaturwechseltests können die zu erwartende Lebensdauer abgeschätzt und die Bauelemente anforderungsgemäß ausgewählt werden. Abb. 2.4 zeigt diese Vorgehensweise, wobei ggfs. die Parameter und Randbedingungen iterativ angepasst werden müssen.

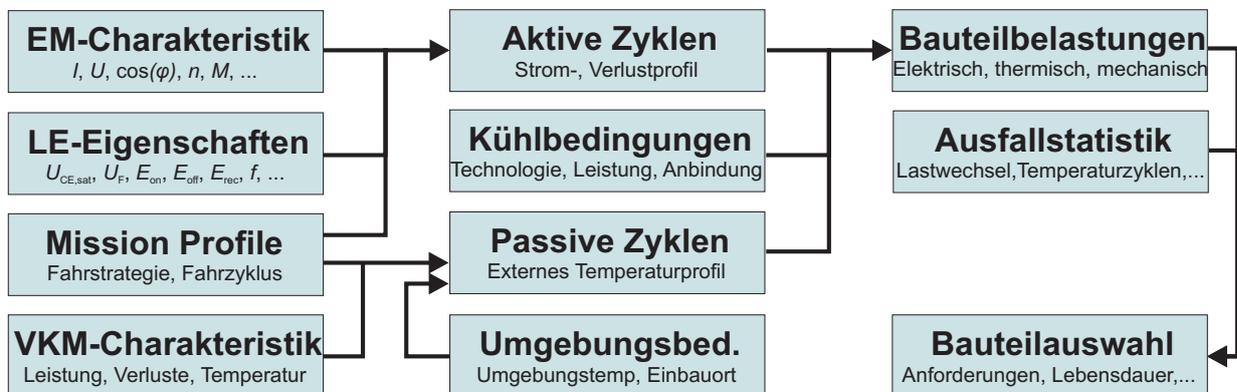


Abbildung 2.4: Vorgehensweise zur Bestimmung eines Anforderungsprofils [Chri]

Durch die klimatischen Bedingungen im Fahrzeug, der Eigenerwärmung durch die in Wärme umgewandelten elektrischen Verluste und ggfs. dem zusätzlichen Temperatureintrag der VKM unterliegen alle Komponenten der Leistungselektronik im Vergleich zu Standardanwendungen relativ hohen Temperaturen und Temperaturzyklen. Dies gilt vor allem für die Laststrom führenden Leistungshalbleiter mit entsprechenden Wärmeverlusten, wobei die Forderung nach einer hohen Leistungsdichte sowie Integrationslösungen die Bedingungen weiter verschärfen. Für eine Reduzierung der Verlustwärme, eine Erhöhung der Betriebstemperaturen bei geringerem Kühlaufwand oder eine Steigerung der Leistungsdichte erscheinen Halbleiter eines Halbleitermaterials mit größerem Bandabstand aussichtsreich. Allerdings muss hierfür die Aufbau- und Verbindungstechnik des Leistungshalbleiters ebenfalls für die hohen Temperaturen und Temperaturwechsel ausgelegt sein und gleichzeitig eine gute Wärmeanbindung an die Wärmesenke gewährleisten.

Photovoltaik-Wechselrichter

Die jährliche mittlere Sonneneinstrahlung S beträgt ca. 1 MWh/m^2 in Deutschland [Enge]. Um die eingestrahelte Energie nutzbar zu machen, werden sogenannte Photovoltaikanlagen (PV) eingesetzt, die die Sonnenenergie direkt in elektrische Energie umwandeln. Die generierte elektrische Leistung P kann dann bedarfsgerecht an einen Verbraucher vor Ort abgegeben oder in ein Versorgungsnetz eingespeist werden. Um eine möglichst hohe Ausbeute zu erwirtschaften, besitzt die Effizienz des Systems eine hohe Priorität. Abb. 2.5 zeigt das System und dessen Wirkungsgradkette.

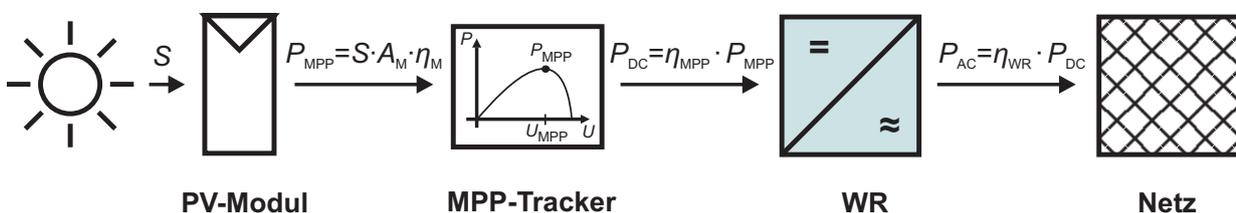


Abbildung 2.5: Wirkungsgradkette eines PV-Systems

Die Umwandlung erfolgt üblicherweise durch Solarzellen auf Silizium-Basis und beruht auf dem photoelektrischen Effekt. Hierbei werden an einem pn-

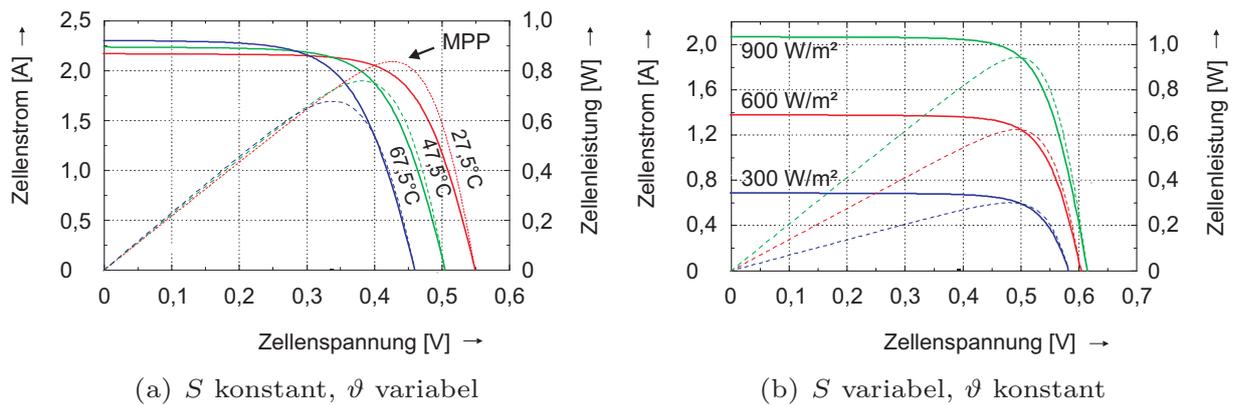


Abbildung 2.6: Strom-Spannungskennlinie einer Siliziumsolarzelle [Muts]

Übergang in der Solarzelle sowohl aus direkter als auch diffuser Sonnenstrahlung Elektronen-Löcher-Paare generiert. Die erzeugten Ladungen werden in der Raumladungszone der Sperrschicht getrennt und ermöglichen einen DC-Stromfluss. Für Photovoltaikanwendungen sind Solarzellen mit mono- und polykristalliner sowie amorpher Kristallstruktur erhältlich, die sich in Herstellungskosten, Wirkungsgrad und Lebensdauer unterscheiden. Die für Großanlagen eingesetzten Solarmodule sind meist polykristallin und besitzen einen Wirkungsgrad von etwa 13-15%. Monokristalline Zellen liegen leicht darüber, wobei im Laborbetrieb sogar Wirkungsgrade von etwa 19-23% erreicht wurden. Die für eher kleine Leistungen eingesetzten amorphen Zellen besitzen relativ geringe Wirkungsgrade von 4-8%, sind dafür aber kostengünstig. Gängige Solarzellen (100 cm^2) erzeugen bei einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 eine Gleichspannung von $0,5 \text{ V}$ und einen Gleichstrom von 3 A [Enge]. Für die Netzeinspeisung muss die Generatorspannung über der Netzspannung liegen. Um diese Spannung zu erreichen, werden Module in Reihe geschaltet, so dass sich sogenannte Strings ergeben. Für höhere Leistungen können dann mehrere Strings parallelgeschaltet werden. Neben der Sonneneinstrahlung hat auch die Temperatur starken Einfluss auf die U - I -Charakteristik der Zelle. Die maximale Ausgangsleistung oder auch Maximum Power Point (MPP) ergibt sich aus dem Produkt von generiertem Strom und sich einstellender Spannung bei der jeweiligen Temperatur (vgl. Abb. 2.5 und 2.6). Für eine hohe Ausnutzung der Photovoltaikanlage wird über einen intelligenten DC/DC-Wandler (MPP-Tracker) oder die Regelung eines Wechselrichters (WR) die Last so angepasst, dass die Ausgangsleistung maximal wird [Schi].

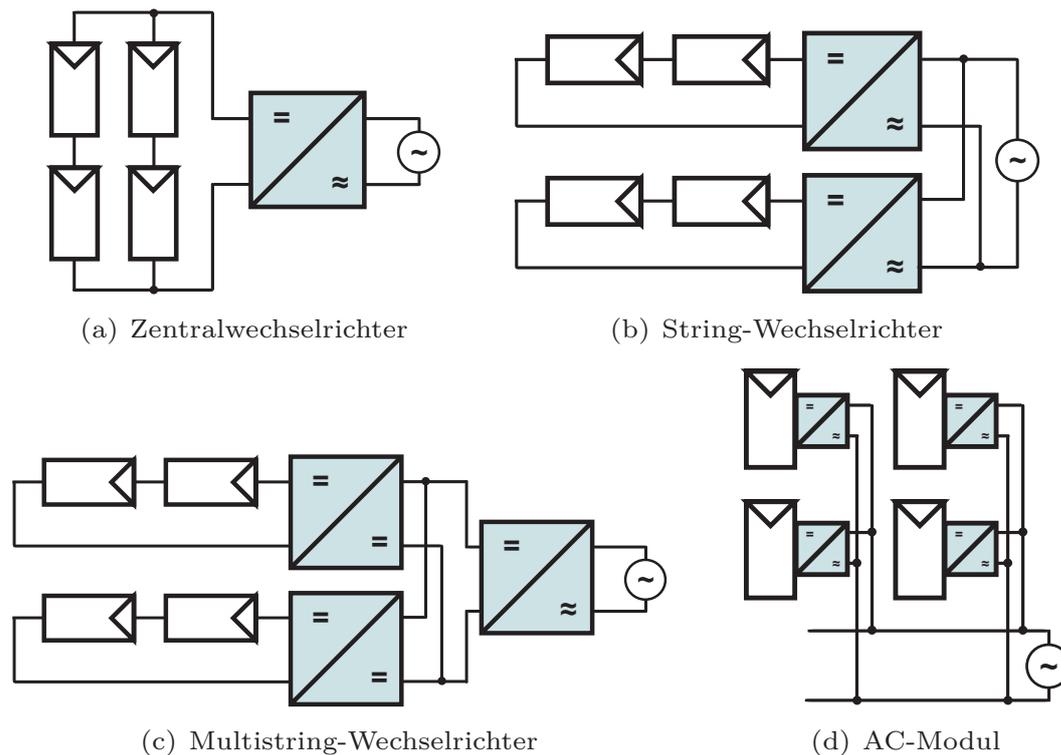


Abbildung 2.7: Typische Photovoltaik-Anlagenkonfigurationen [Schi]

Zur Anpassung der aus der Zelle generierten elektrischen Gleichgrößen an einen Verbraucher oder ein Wechselstromnetz werden DC/DC- und DC/AC-Wandler genutzt. Je nach Anlagenleistung und Einsatzbedingungen finden im Wesentlichen folgende vier Konfigurationsvarianten ein- oder dreiphasig Einsatz (Abb. 2.7). Der Zentralwechselrichter wird für Leistungen über 40 kWp eingesetzt und besteht aus mehreren parallelen Strings, die über einen Wechselrichter in das Stromnetz einspeisen. In der Konfiguration in Abb. 2.7 b) erhält jeder String einen Wechselrichter, so dass Fehlanpassungen minimiert werden können. Solche String-Wechselrichter finden Einsatz bei kleineren Leistungen (1-5 kWp) und können als klassische Vollbrücke mit Trafo oder trafolos realisiert werden. Für größere Leistungen können mehrere Strings parallel zu einem Multistring entsprechend Abb. 2.7 c) an einem Wechselrichter geschaltet werden. Hierbei erhält jeder String seinen eigenen MPP-Tracker, so wird die Modularität gewahrt und gleichzeitig eine höhere Leistung erreicht. Unter der Konfiguration in Abb. 2.7 d) sind modulintegrierte Wechselrichter zusammengefasst, deren Einsatz für sehr kleine Leistungen (0,1 - 0,3 kWp) geeignet ist. Hier besteht eine hohe Modularität

bei einem optimalen MPP-Tracking. Jedoch erreichen hierbei die sehr kostenaufwendigen Wechselrichter derzeit nicht die Lebensdauernanforderungen der Module [Schi].

Seit der Einführung einer gesetzlich festgesetzten Einspeisevergütung nach dem Erneuerbaren Energiengesetz (EEG) ist der Einsatz von Netz gekoppelten Anlagen enorm angestiegen. Für eine hohe Rendite zählt vorrangig die bestmögliche Auslastung der Anlage bei möglichst geringen Investitions- und Wartungskosten sowie langer Laufzeit. Somit sind die Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Solarzellen und Wechselrichtern von großer Bedeutung und rechtfertigen sogar höhere Material- und Bauteilkosten. An erster Stelle wird eine Wirkungsgradverbesserung der Solarzellen angestrebt. Um alle Optimierungsmöglichkeiten auszuschöpfen, wird parallel aber auch versucht auf der Leistungselektronikseite einen maximalen Wirkungsgrad für alle Betriebspunkte zu erreichen. Die Einspeisung ins Netz muss den geforderten Standards, Normen und Anforderungen gemäß „Technischen Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz [BDEW]“ entsprechen und ggfs. zusätzlichen Forderungen der Netzbetreiber wie Verhalten im Fehlerfall, Netzstützung/Stabilisierung, Trennen bei Wartungsarbeiten, transiente Überspannungen und EMV-Verhalten genügen [Zach1]. Weiter sollen die Anlagen aber auch ein möglichst kleines Bauvolumen einnehmen oder z. B. in der Haustechnik als halbtransparentes Fenster integrierbar sein.

Zur weiteren Wirkungsgradsteigerung der ohnehin sehr effizienten Wechselrichter sind die Hersteller stetig auf der Suche nach effizienteren und robusteren Leistungshalbleitern. Neben der Effizienzsteigerung können hierdurch auch der Kühlaufwand und somit Herstellungskosten reduziert sowie kompaktere Wechselrichter realisiert werden, die darüberhinaus über eine längere Lebensdauer den Ertrag der Photovoltaikanlage erhöhen. Hierfür sind SiC-Halbleiter ebenfalls aussichtsreiche Kandidaten, wobei mehrere Halbleiterschalterstrukturen derzeit in Frage kommen.

Weitere Anwendungen mit erhöhten Anforderungen

Sowohl robustere als auch effizientere leistungselektronische Systeme sind über die beschriebenen Anwendungen hinaus für viele weitere Anwendungen von In-

teresse. So würden temperaturbeständigere Komponenten besonders in der Luft- und Raumfahrt, Bohrtechnik oder auch der Geothermie Einsatz mit Hinblick auf eine erhöhte Einsatztemperatur oder eine kompaktere und leichtere Bauweise durch Reduzierung des Kühlaufwandes finden. Darüberhinaus kann durch unempfindlichere Halbleiter, z. B. gegen Höhenstrahlung, der Aufwand bei höher gelegenen Einsatzorten deutlich reduziert werden. Entscheidend für Ausfälle, Lebensdauer und Wartung sowie die damit verbundenen Kosten ist eine größtmögliche Zuverlässigkeit der Komponenten. Ebenso bieten verlustärmere Leistungshalbleiter die Möglichkeit die Schaltfrequenz zu erhöhen und so Systeme weiter zu optimieren. Als Beispiel sei an dieser Stelle die berührungslose Energieübertragung genannt, bei der eine Steigerung der Schaltfrequenz durch günstigere dynamische Eigenschaften positiven Einfluss auf die Größe der Elektronikkomponenten, Kerngröße und den erreichbaren Luftspalt hat [Meins].

2.2 Aktuelle Silizium-Leistungshalbleiterbauelemente

Die Effizienz eines leistungselektronischen Wandlers hängt maßgeblich von den Eigenschaften der Leistungshalbleiterbauelemente ab. Die im Halbleiter entstehenden Verluste werden in der Regel von der Betriebstemperatur beeinflusst und hängen neben den elektrischen Betriebsbedingungen von der Halbleiterstruktur, deren Realisierung und dem verwendeten Material ab. Hierzu gab es in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte, die zu einer Verbesserung der elektrischen Eigenschaften der Leistungshalbleiter führten und unterschiedliche Produkte für die jeweiligen Einsatzgebiete hervorbrachten. Als Halbleitermaterial wird derzeit fast ausschließlich Silizium (Si) eingesetzt.

In Hinblick auf eine angestrebte Zwischenkreisspannung von etwa 600 V werden typischerweise Bauelemente mit einer Sperrspannung von 1200 V verwendet. Daher werden für die späteren Vergleiche mit SiC-Bauelementen der in diesem Bereich dominierende Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) und eine Emitter Controlled (EmCon) Diode (Fa. Infineon) als Referenz verwendet. Der von unten an diese Spannungsklasse angrenzende Metall Oxid Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) wird ebenfalls vorgestellt, aber im Anschluss als Si-Variante nicht näher betrachtet. Nach einer kurzen Vorstellung der Halbleiterstrukturen der EmCon-Diode, des CoolMOS und des IGBT erfolgt die Vorstellung der Verlustmechanismen bei hartschaltenden Wechselrichtern.