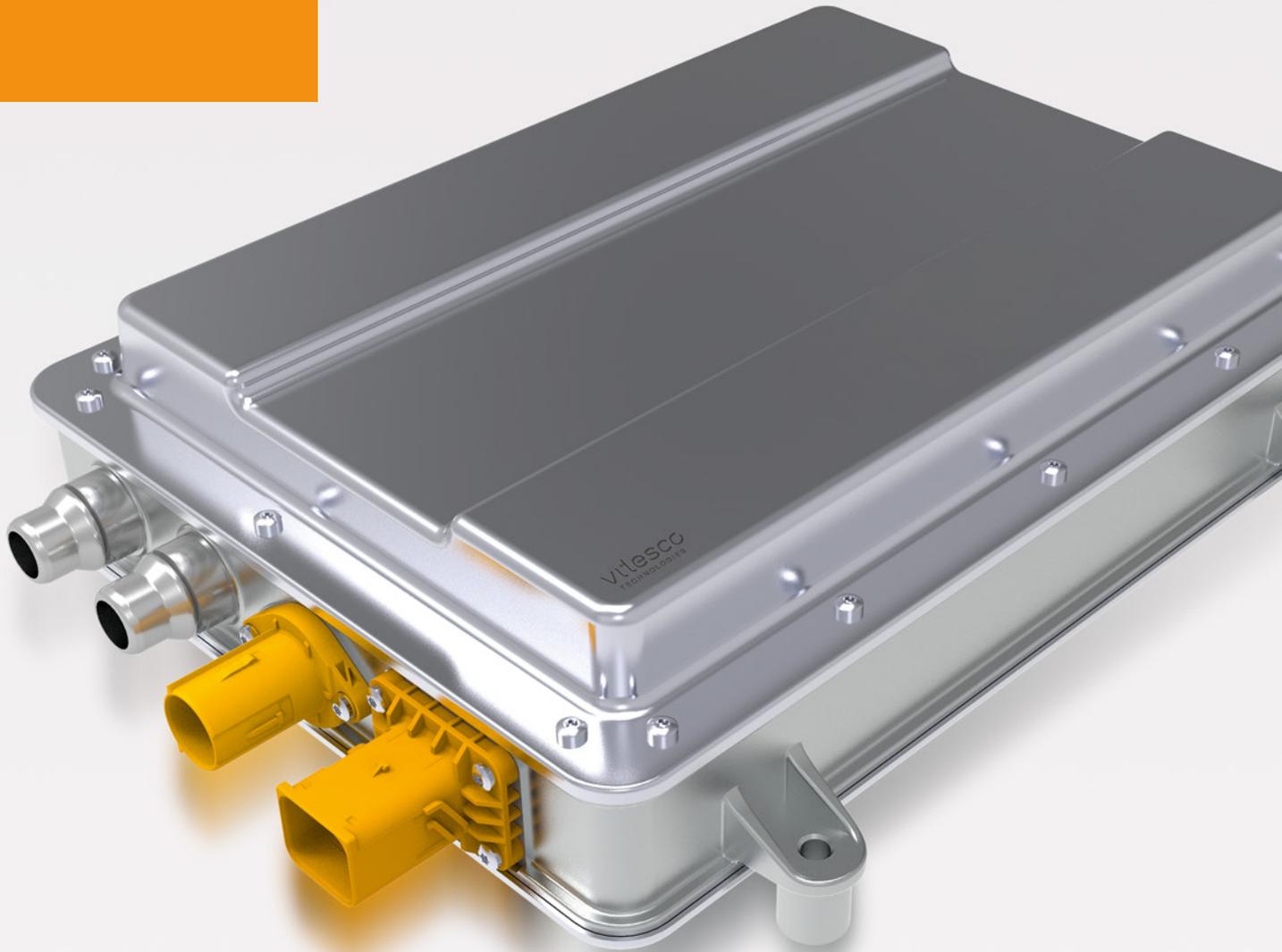


ATZ

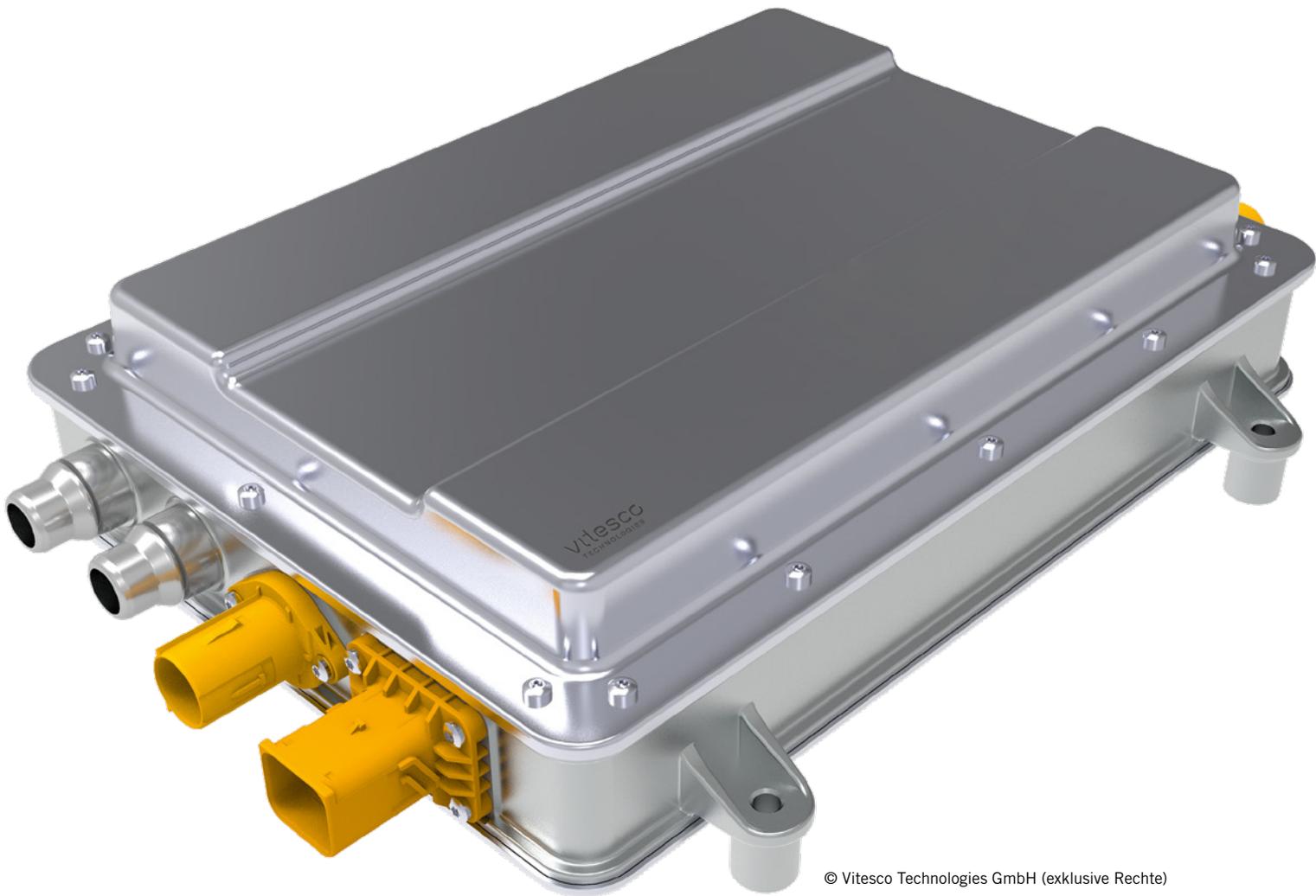
extra



LEISTUNGSELEKTRONIK

Hochvolt-Box für elektrifizierte Fahrzeuge

vitesco
TECHNOLOGIES



© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte)

Hochvolt-Box für elektrifizierte Fahrzeuge

Durch eine höhere mechatronische Integration in der Umwandlung und Verteilung elektrischer Energie im Fahrzeug lassen sich einerseits Gewicht und Kosten senken, andererseits steigt die funktionale Zuverlässigkeit. Mit der für das erste Serienfahrzeug vorbereiteten Hochvolt-Box zeigt Vitesco Technologies einen Neuansatz der Systemarchitektur bei der Lade- und Umwandlungselektronik. Wide-Bandgap-Transistoren spielen dabei eine wachsende Rolle.

AUTOREN



Dipl.-Ing. Philippe Boissiere
ist Entwicklungsgruppenleiter im Bereich Electrification Technology bei Vitesco Technologies in Toulouse (Frankreich).



Dipl.-Ing. Martin Glötzl
ist Product Group Manager Onboard-Charger & Charging Communication bei Vitesco Technologies in Regensburg.



Dipl.-Ing. Markus Hackelsperger
ist Leiter Produktgruppenmanagement im Bereich Electronic Controls bei Vitesco Technologies in Regensburg.



Dipl.-Ing. Karim Boukhris
ist Experte im Bereich Power Electronics für Hochvolt-Box und Wide-Band-Gap-Komponenten bei Vitesco Technologies in Toulouse (Frankreich).

Elektromobilität ist gleichermaßen Hoffnungsträger und Herausforderung. Hoffnungsträger, weil die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen inzwischen weltumspannend auf elektrifizierte Fahrzeuge ausgerichtet werden. Herausforderung, weil dieser globale Trend gleichbedeutend ist mit enormen Stückzahlsteigerungen. Vor allem zwei Optimierungsfelder müssen daher konsequent angegangen werden: Zum einen die Effizienz des elektrischen Antriebs, um die beim Laden und Fahren eingesetzte elektrische Energie möglichst vollständig nutzen zu können. Dieser Punkt entscheidet mit über die Nachhaltigkeit und damit die Bewertung der Elektromobilität. Zum anderen geht es um Kostenpotenziale, denn hohe Stückzahlen lassen sich nur mit schlanken Technologien und einer konsequenten Vermeidung jeder Form von Verschwen-

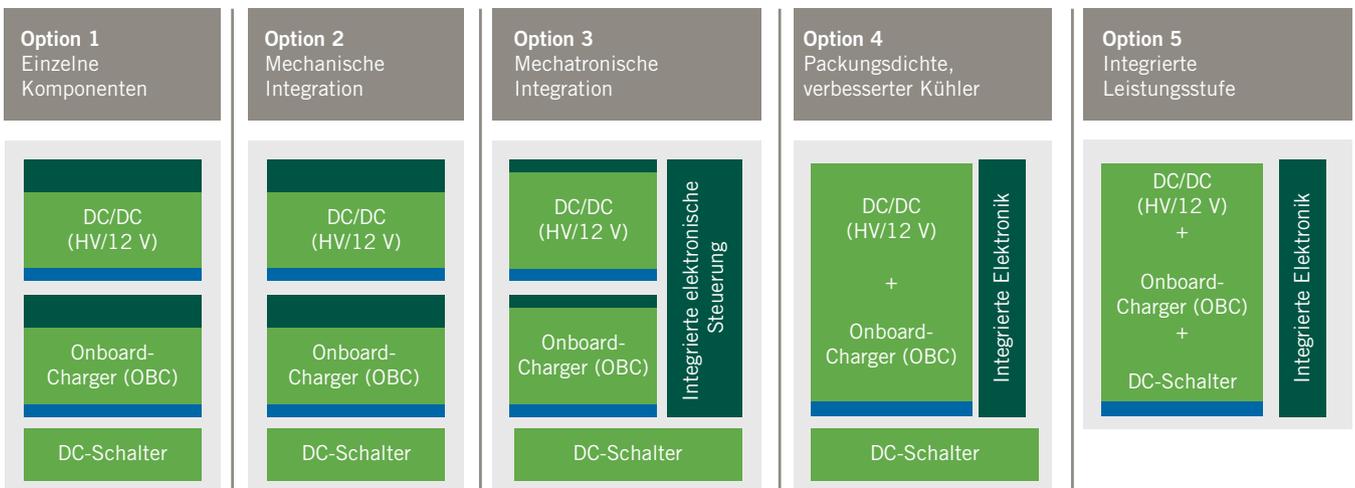
dung, etwa in Form mehrfacher oder vermeidbarer Infrastruktur im Fahrzeug, marktfähig umsetzen. Gerade die Systemarchitektur von Elektrofahrzeugen und Plug-in-Hybriden bietet lohnende Ansatzpunkte für die Optimierung [1].

Eine zentrale Aufgabe im elektrifizierten Fahrzeug ist das Management der elektrischen Energieflüsse. Angefangen bei den unterschiedlichen Ladevorgängen (AC-Laden und DC-Schnellladen), über die Energieversorgung des 12-V-DC-Bordnetzes aus dem Hochvoltnetz bis hin zur Energieverteilung im DC-Hochvoltstrang des Fahrzeugs, spielen Stromflüsse und Umspannprozesse eine zentrale Rolle. Bisher werden für die einzelnen Aufgaben des Ladens und Wandeln separate Leistungselektroniken verbaut: Ein Onboard-Charger übernimmt das AC-Laden der Hochvoltbatterie, ein DC/DC-Wandler versorgt das 12-V-Bord-

netz, und eine weitere Elektronik macht das Fahrzeug mit einer 800-V-Architektur schnellladefähig, **BILD 1**.

Eine solch diskrete Architektur markiert die typische Zwischenstufe einer Technologie in der Entwicklungskurve. Effizient ist dieser diskrete Aufbau nicht, denn er bringt zusätzlich Masse, Volumen und Kosten mit sich. Neben Gehäusen und schweren, kostenintensiven Verkabelungen mit in der betreffenden Leistungsklasse teuren Verbindungselementen geht es hier vor allem um die jeweilige Steuerelektronik, um Filterfunktionen und Kühlleitungen.

Vitesco Technologies hat die bereits veröffentlichten Architekturanalysen genutzt, um bei der Hochvoltladeelektronik anzusetzen und durch höhere mechanische Integration Gewicht, Volumen und Kosten aus dem Fahrzeug zu nehmen. Gleichzeitig steigt die funktionale



■ Komponenten ■ Elektronik ■ Kühlung

BILD 1 Integrationsformen der Lade- und Umspanntechnik im Fahrzeug von diskret bis vollständig integriert (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

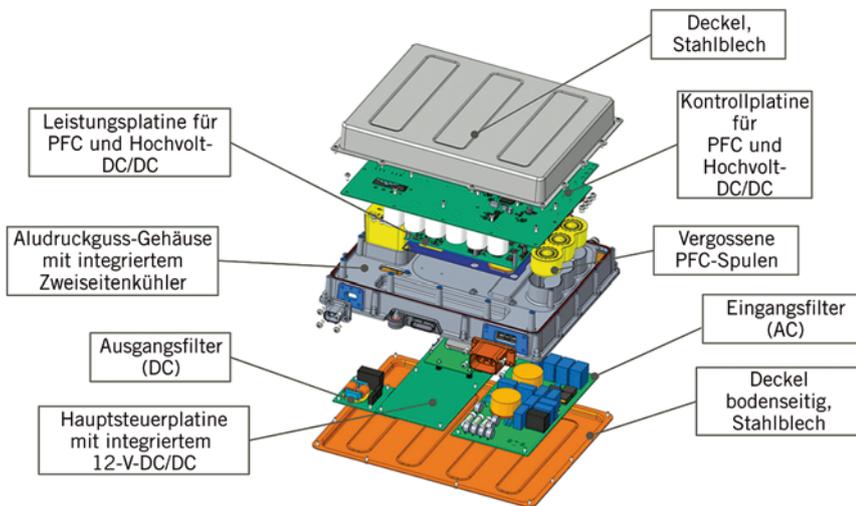


BILD 2 Dreidimensional verzahnter Aufbau der modularen Funktionsbausteine in der Hochvolt-Box (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

Zuverlässigkeit der Ladeelektronik. Dieser neue Architekturansatz für den Spannungsbereich von bis zu 800 V, Hochvolt-Box genannt, wird erstmals bei einem OEM im Premiumsegment in Serie gehen.

AUFBAU UND FUNKTION DER HOCHVOLT-BOX

Die Hochvolt-Box wurde in einem verteilten, internationalen Prozess in Regensburg (Deutschland),

Timisoara (Rumänien), Toulouse (Frankreich) und Auburn Hills (USA) entwickelt. Das Resultat ist eine hochgradig dreidimensional verzahnte Einheit, die durch ihren modularen, skalierbaren Aufbau diesem Anspruch gerecht wird. Entweder findet nur die Integration aus Onboard-Charger (OBC) für AC-Laden mit 7,2 bis 22 kW (wahlweise für ein bestimmtes Stromnetz oder weltweit nutzbar) und bidirektionalem 12-V-DC/DC-Wandler für bis zu 3,7 kW statt, oder es wird auch die Spannungsverteilung (DC-Schalter/ Power Distribution Unit) im Fahrzeug inkludiert, die für hohe DC-Ladeleistungen ebenso geeignet ist, **BILD 2**.

Das Hauptmerkmal der mechatronischen Integration zeigt sich beispielsweise daran, dass die Leistungselektronik von Lader und 12-V-DC/DC-Wandler einen gemeinsamen Kontroll- und Ansteuerteil haben. Auch der EMV-Filter für die HV-DC-Seite wirkt für beide. Die mechanische Konstruktion mit einem Sandwichkühler trägt zum modularen und trotzdem individuellen Aufbau bei. Es sind modulare Erweiterungen denkbar wie ein HV-DC-Booster, die Lade-

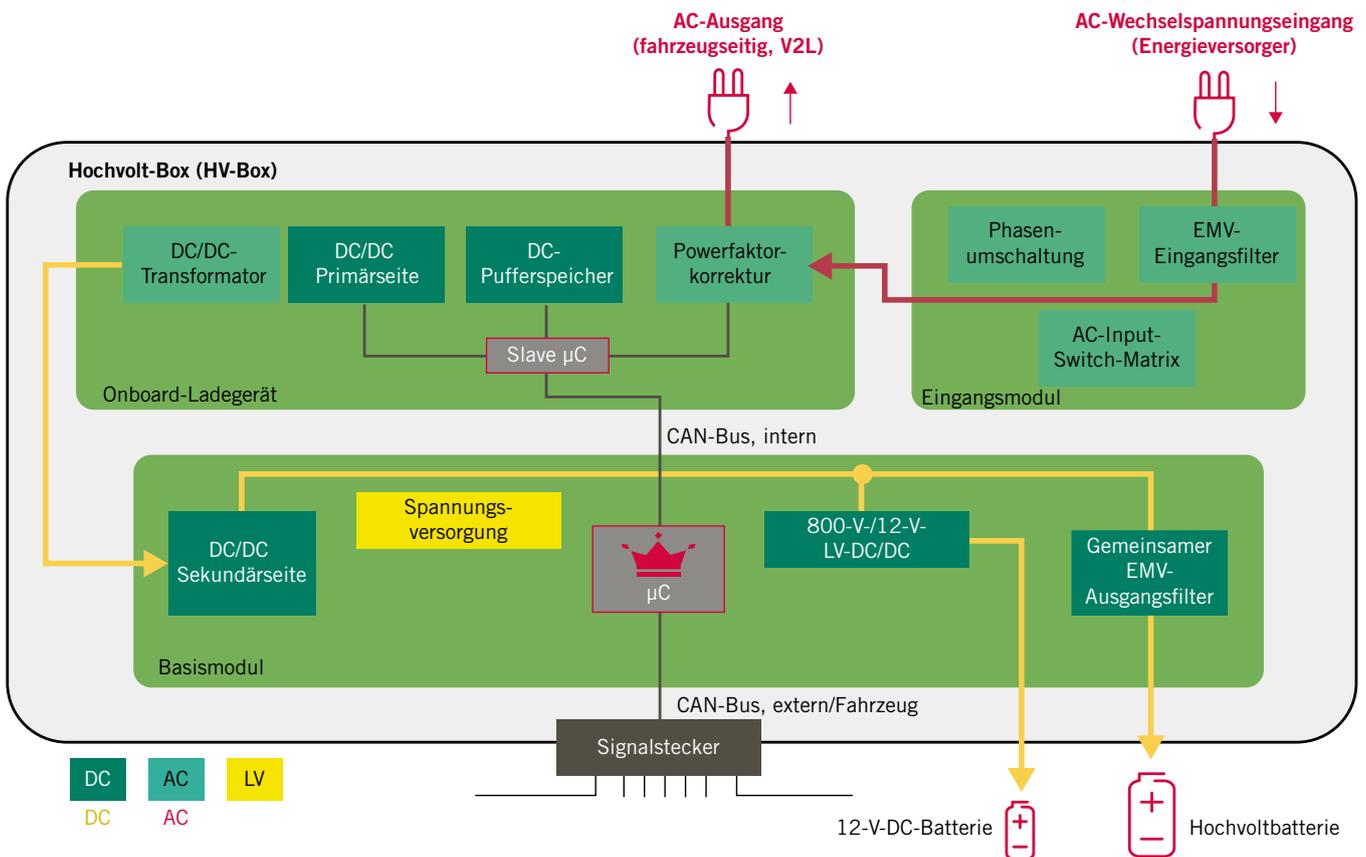


BILD 3 Prinzipdarstellung der Systemarchitektur (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

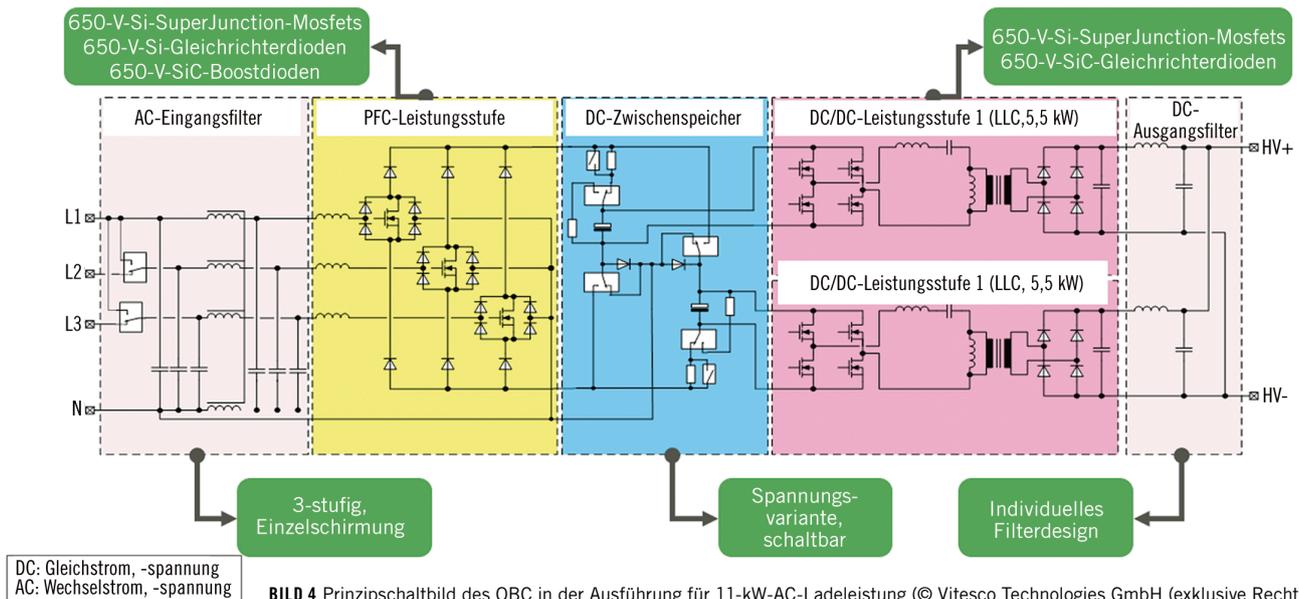


BILD 4 Prinzipschaltbild des OBC in der Ausführung für 11-kW-AC-Ladeleistung (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

kommunikation, ein HV-Heizer und das Batteriemanagementsystem.

Die modulare Hochvolt-Box spart Platz, Gewicht und Kosten beispielsweise bei Gehäuse und Hochvoltverkabelung. Neben der Bauraumoptimierung und der einfacheren Integration ins Fahrzeug im Vergleich zu Einzelprodukten lässt sich so ein robusteres Design mit höherer Zuverlässigkeit umsetzen, denn es sind erfahrungsgemäß gerade die elektrischen Verbindungsstellen, die langfristig neuralgisch sein können. Mit dem Ziel der Modularität floss viel Know-how in die Definition von Schnittstellen bei Submodulen der Hochvolt-Box unter der Maßgabe der Skalierbarkeit ohne ständig neues Trial-and-Error-Testen. Grundlage ist hier ein konsequentes Design for Manufacturing, denn nur so lassen sich aus unterschiedlichen Modulvarianten zusammengesetzte Produkte effektiv und mit hoher Qualität auf einer Linie fertigen.

SYSTEMARCHITEKTUR UND FUNKTIONSWEISE

Während der in **BILD 2** gezeigte Aufbau der Hochvolt-Box die Aufteilung der Kernfunktionen auf vier einzelne Leiterplatten zeigt, stellt **BILD 3** die Systemarchitektur dar. Der Bereich des AC-Eingangs ist hervorgehoben. Die vier gezeigten großen Funktionsbereiche entsprechen auch in dieser Darstellung den vier Leiterplatten der Hochvolt-Box. Die Prinzipdarstellung in **BILD 4** gibt von links nach rechts den Ablauf der

AC-Ladeelektronik am Beispiel einer Skalierungsstufe für bis zu 11-kW-AC-Ladeleistung wieder. Der AC-Eingangsfilter ist so ausgelegt, dass wahlweise ein ein- oder ein dreiphasiges Laden möglich ist. In der Schaltung für den Leistungsfaktorkorrekturfilter (Power Factor Correction, PFC) zum Schutz vor Oberschwingungen sind sowohl konventionelle Chips (650-V-Mosfets und Gleichrichterdiolen) als auch Siliziumkarbidkomponenten verbaut. Das gilt für die Hochvolt-Box insgesamt: Si- und SiC-Technologie halten sich hier bereits die Waage. Die Platzierung der vergossenen PFC-Filterspulen dient der effizienteren Kühlung. Im eigentlichen Hochvolt-DC/DC-Wandlerabschnitt wird die Ladeleistung auf zwei Pfaden mit jeweils bis zu 5,5 kW Leistung aufgeteilt, um die Effizienz der Wandlung zu optimieren. Bei der Aus-

führung für bis zu 22-kW-AC-Ladeleistung wird analog auf zwei Pfaden mit jeweils bis zu 11 kW gewandelt.

POTENZIAL VON WIDE-BANDGAP-MATERIALIEN

Künftig geht es darum, die Ladeelektronik von Elektrofahrzeugen noch effizienter zu machen, denn auch der Wirkungsgrad beim Laden der Traktionsbatterie beeinflusst den Gesamtenergieverbrauch. Ein zweites Entwicklungsziel besteht darin, das Bauvolumen der Hochvolt-Box weiter zu verringern, um größere Freiheiten für die Integration zu schaffen. Wide-Bandgap-Halbleitermaterialien (WBG) haben für beide Ziele ein großes Potenzial. Aktuell werden bereits SiC-Komponenten in der Hochvolt-Box verbaut. Künftig wird auch die Nutzung

SiC (Siliziumkarbid)	GaN (Galliumnitrid)
<p>Aufbau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vertikaler Komponentenaufbau • Mosfetkonstruktion • SiC-Substrat ist höherwertiger als reines Silizium • Hohe Stromdichte 	<p>Aufbau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Horizontaler Komponentenaufbau • Zwei Lagen auf Siliziumträger • GaN (einige µm) • AlGaN (einige nm) • Sehr hohe Elektronenbeweglichkeit • Sehr flacher Aufbau möglich
<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niedriger Einschaltwiderstand $R_{DS(ON)}$ (>Stabilität als GaN über Temperatur) • Höhere Durchbruchspannung als GaN • Hohe Schaltfrequenzen möglich • Bidirektionale leitende Komponente 	<p>Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niedriger Einschaltwiderstand $R_{DS(ON)}$ • Sehr hohe Schaltfrequenzen möglich (> SiC) • Spannungsmaximum ~650 V; GaN Epitaxie • Bidirektionale leitende Komponente

BILD 5 Struktur und Charakteristik von WBG-Transistoren (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

Vorentwicklung/Untersuchungen zu WBG

Marktsituation und Aktivitäten

- Austausch mit 14 Lieferanten
- SiC (Siliziumkarbid)
- GaN (Galliumnitrid)
- Unterschiedliche Gehäusebauformen

Integration der neuen Bausteine in das generische Design

- HV-Box (7,2 kW/400 V/1-ph, V2L/V2V)
- Verwendung der PFC-Topologie „Totem-Pole“ zur Verifikation SiC und GaN gegenüber IGBT-Schaltelementen



„Bottom und Top Cooled“



„Top Cooled Isolated“



TO-247

Test und Validierung der WBG-Baugruppen

- Elektromagnetische Verträglichkeit, IGBT vgl. WBG
- Wirkungsgradmessungen der Module und Gesamtprodukt
- Produktverifikation, -qualifikation inkl. Lebensdauertest

Einsatzziel: Wirkungsgradverbesserung

Verlustleistungsvergleich im PFC-Modul
→ IGBT- vs. SiC-Schaltelemente

- 75 kHz/30 W im IGBT-Schaltelement
- 75 kHz/18 W im SiC-Schaltelement
- ≈ 40 % weniger Verluste

Einsatzziel: Erhöhung der Packungsdichte

Erhöhung der Schaltfrequenz im PFC-Modul
Baugruppenreduktion der Magnetbaugruppen

- Frequenzerhöhung von 75 auf 200 kHz
- Verlustleistung ~30 W pro Schaltelement
- ≈ 40 - 50 % Verkleinerung der PFC-Spulen

75 kHz [→]


[←] 200 kHz

BILD 6 SiC- und GaN-Chips haben Potenzial zur Optimierung von Effizienz oder Leistungsdichte beziehungsweise für eine graduelle Verbesserung beider Zielgrößen (© Vitesco Technologies GmbH (exklusive Rechte))

von Galliumnitridkomponenten (GaN) untersucht und vorbereitet. Beide WBG-Materialien zeigen sowohl übereinstimmende Vorteile, als auch spezifische Unterschiede, die sich für Anwendungen in der Ladeelektronik gezielt nutzen lassen.

Beiden gemeinsam sind deutlich höhere Schaltfrequenzen und deutlich niedrigere Schalt- beziehungsweise Durchlassverluste ($R_{DS(ON)}$), **BILD 5**. Im Detail haben SiC-Chips Vorteile bei hohen Leistungen und Temperaturen, GaN-Chips dagegen bieten höhere Schaltfrequenzen und geringere Schaltverluste. Damit sind WBG-Materialien eine Schlüsseltechnologie für den Übergang zu 800-V-Systemen. Da dieser schneller erfolgt, als ursprünglich angekündigt, ist die Weiterentwicklung automobiler WBG-Lösungen essenziell.

Beide WBG-Materialien haben nicht nur deutlich geringere Verlustleistungen, sondern erlauben auch höhere Betriebstemperaturen, was höhere Leistungsdichten bei geringeren Kühlanforderungen zulässt. Wahlweise ermöglichen WBG-Chips also entweder eine höhere Effizienz bei gleicher Schaltfrequenz oder eine höhere Leistungsdichte durch höhere Schaltfrequenzen (durch kleinere magnetische Spulen). Auch eine ausgewogene Balance in der Ausnutzung beider Potenziale ist möglich, **BILD 6**. Für die genannten Herausforderungen der Elektromobilität im Hinblick auf Effizienz, Kosten und Nachhaltigkeit spielen WBG-Materialien künftig eine wachsende Rolle. Sie werden zum Thermal Management und zur Baugrößenoptimierung einen entscheidenden Beitrag leisten können.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine Hochvolt-Architekturanalyse hat gezeigt, dass sich eng verwandte Aufgaben der Energieverteilung, -umwandlung und -speicherung vorteilhaft integrieren lassen. Dabei geht es nicht um eine simple Gehäuseintegration, sondern um eine konsequent integrierte Lösung, die zur Erfüllung mehrerer Aufgaben in einer Einheit verzahnt wird und dabei gemeinsame Infrastruktur nutzt, etwa zur Kühlung. Der Onboard-Charger dient als Integrationsplattform für die Hochvolt-Box, die in der Ausführung mit dem Mindestfunktionsumfang den OBC und den 12-V-DC/DC-Wandler mechatronisch integriert.

Die innovative Komponente fungiert als eine Art Umspannwerk an Bord des Elektroautos und vereint drei Funktionen für Betriebsspannungen bis 800 V: Erstens regelt sie den AC-Ladevorgang aus dem Wechselspannungsnetz, indem sie diese in Gleichspannung umwandelt und damit den Hochvoltakku speist. Zweitens

übernimmt die Hochvolt-Box das Hochvoltmanagement im Fahrzeug, speziell die Energieverteilung aus der Hochvoltbatterie zu den Verbrauchern als auch DC-Schnellladefunktion an Hochenergie-ladesäulen im dreistelligen kW-Bereich. Drittens versorgt die Hochvolt-Box das klassische 12-V-Bordnetz mit Energie.

Die Schnittstellen innerhalb der Hochvolt-Box-Module sind so angelegt, dass weitere Funktionen integriert werden können. Dieses Hochintegrationskonzept mit Modularisierung und Skalierbarkeit führt zu verkürzten Entwicklungszeiten bei attraktiven Kosten. Durch den Wegfall von Hochvoltkabelstrecken und Hochvoltsteckverbindern und eine Vereinfachung der Kühlstrecken und -anschlüsse sinken Gewicht und Bauvolumen, während die Robustheit und Zuverlässigkeit der Lösung steigen. Künftiges Potenzial, einerseits im Hinblick auf eine weitere Bauraumverringern, andererseits im Hinblick auf weitere Effizienzsteigerungen, bieten Wide-Bandgap-Materialien wie SiC und GaN, deren wachsender Einsatz in den Elektroniken der Hochvolt-Box bereits vorbereitet wird.

LITERATURHINWEIS

[1] Adler, C., Deinhard, S., Hackelsperger, M., Mühlbauer, K.: Hochvolt-Architekturanalyse – Schlüssel zu bezahlbarer Elektromobilität. In: ATZ 120 (2018) Nr. 12, S. 52-57

IHRE ZUKUNFT IST UNSER ANTRIEB.

UNSER ZIEL IST EINE SAUBERE
UND NACHHALTIGE MOBILITÄT.

Unsere Antriebe sind Wegbereiter nachhaltiger Mobilität.

Ob E-Auto, Hybrid oder elektrifizierter Verbrenner:
Vitesco Technologies liefert moderne Antriebstechnik
für saubere und effiziente Fahrzeuge.
Antrieb für Generationen – Vitesco Technologies.

