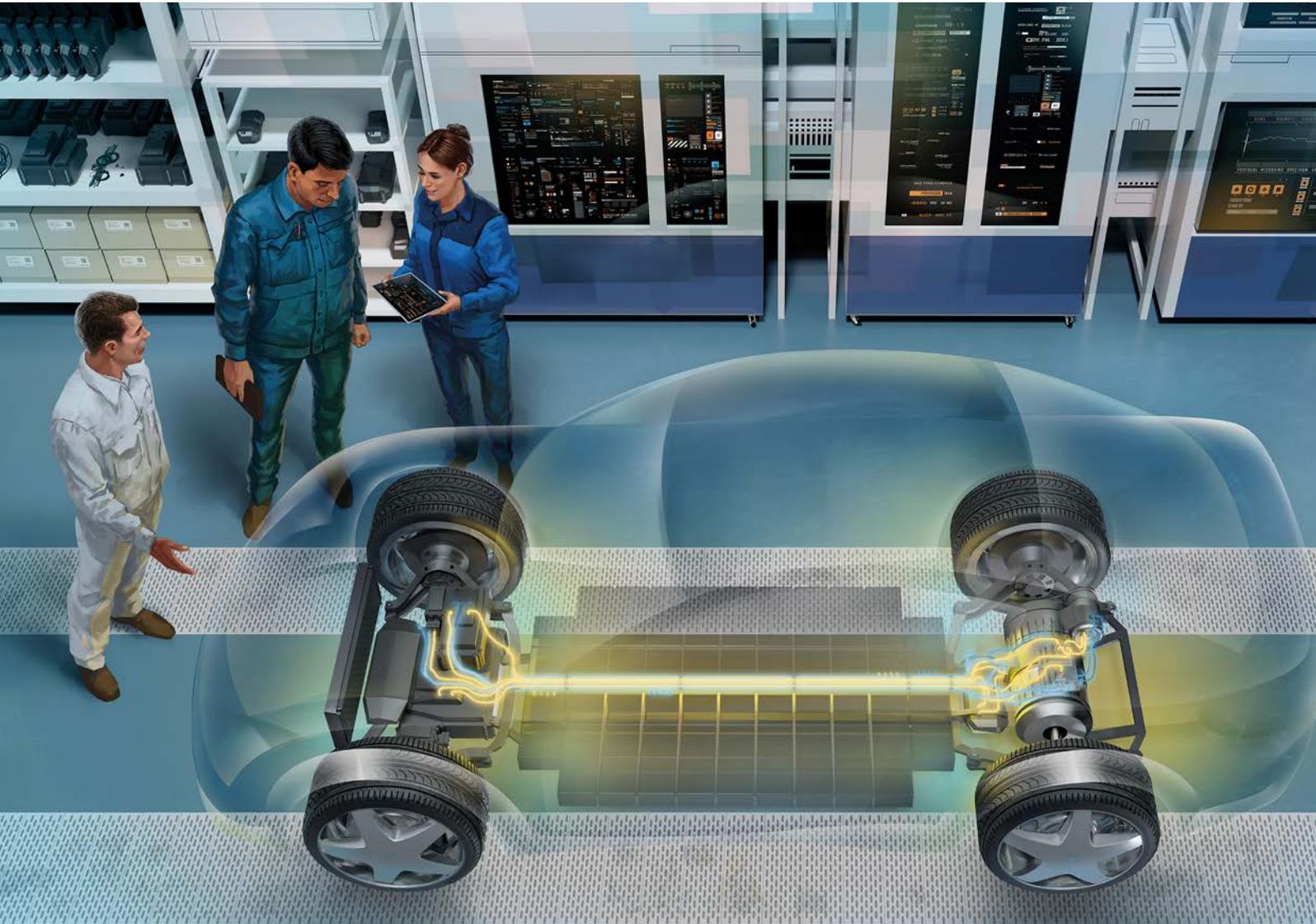


SCALE-UP E-DRIVE



Transformations-Factsheet „Technologische Trends Leistungselektronik“

AUSGABE 10, JANUAR 2025

Autoren:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Fahrzeugkonzepte
Samuel Hasselwander, Fenja Haller, Dr. Ing. Florian Liebetrau, Benjamin Frieske

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

SCALE-UP
E-DRIVE

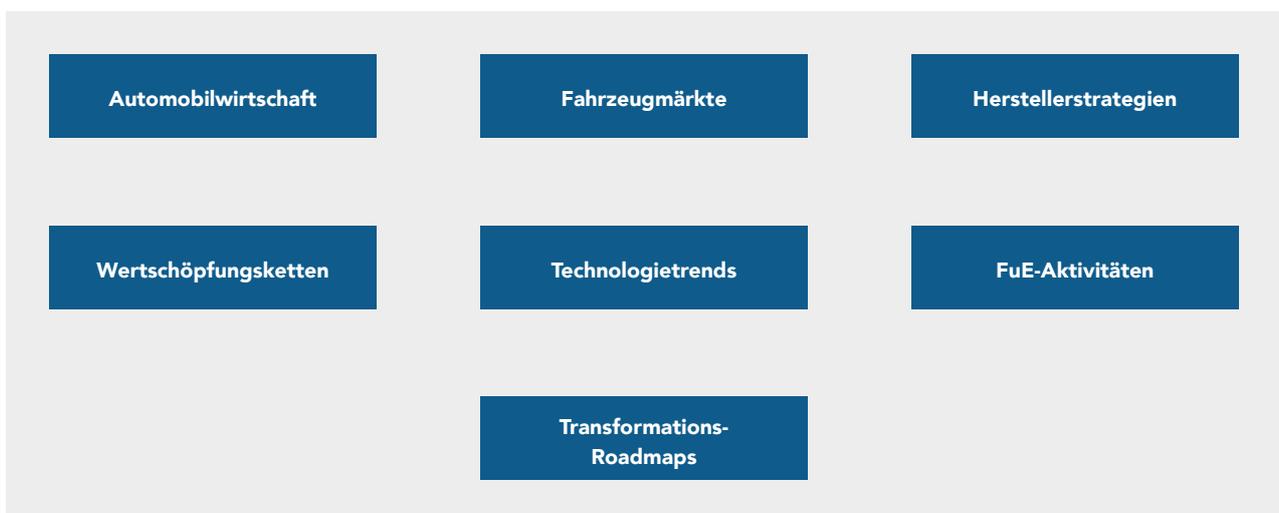
Hintergrund

Der Transformations-Hub „Scale-up E-Drive“ unterstützt insbesondere kleine und mittlere Unternehmen der Automobilwirtschaft in Deutschland bei der Transformation hin zu elektrifizierten Antriebssträngen, indem relevante Trends und Entwicklungen zu Branchen-, Markt-, Technologie-, Produkt- und Produktionswissen aufbereitet, in den internationalen Kontext eingeordnet und in Form von Transformations-Factsheets und -Dashboards bereitgestellt werden.

Diese Informationen bereiten die wesentlichen Entwicklungen im Zuge der Transformation des Antriebsstrangs zielgruppengerecht in kompakter Form auf und dienen der Unterstützung von strategischen Entscheidungsprozessen in den Unternehmen. Übergeordnetes Ziel ist die Erhaltung von Innovations- und technologischer Wettbewerbsfähigkeit, um Wertschöpfung und Beschäftigung auch bei den neuen Produkten und Technologien des Antriebsstrangs in Deutschland zu sichern.

Der Hub fokussiert sich auf folgende Komponenten im Antriebsstrang: E-Motor, Leistungselektronik, Getriebe, Energie- und Thermomanagement sowie die Integration von Batterien und Brennstoffzellen. Dabei stehen unterschiedliche Fahrzeugtypen im Zentrum der Betrachtung.

Entwicklungen und Trends mit Fokus auf die in Abbildung 1 dargestellten Themenschwerpunkte werden kontinuierlich im Laufe des Projekts in Form von Transformations-Factsheets und -Dashboards aufbereitet.



Quelle: DLR

Abbildung 1: Themenschwerpunkte der Transformations-Factsheets und -Dashboards

Das vorliegende Dashboard ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, im Bereich „Technologietrends“ angesiedelt und stellt die Funktionsweise, Technologietrends sowie relevante Kennzahlen für die im Pkw-Bereich eingesetzte Leistungselektronik dar.

Neben dem Wechselrichter für den E-Motor werden dabei auch weitere Fahrzeugkomponenten mit (Leistungs-)Halbleitern betrachtet.

Automobilwirtschaft	Umsatz	Produktion	Import/Export	Wirtschaftsleistung	Beschäftigung	Investitionen	
Fahrzeugmärkte	NZL HEV/EV	Bestand HEV/EV	Ladeinfrastruktur	Pol. Rahmen	DE/EU	USA	Asien
Herstellerstrategien	Ziele	Innovationsstrategien	Modellportfolios	Fzg.-Plattformen	Produktionsstandorte		
Wertschöpfungsketten	GeoMaps	Produktionsnetzwerke	Komponentenabhängigkeiten	Akteure und Lücken	Wertschöpfungsstrukturen		
Technologietrends	E-Motor	Leistungselektronik	Getriebe	Energie- und Thermomanagement	Integration Batterie/Brennstoffzelle		
FuE-Aktivitäten	Top 10	Patentanalyse	Innovationsdynamik	FuE-Schwerpunkte	Nationale Akteure		
Transformations-Roadmaps	TRL	MRL	Entwicklungspfade	Roadmapping	Technologieentwicklung	Delphi	

Quelle: DLR

Abbildung 2: Fokusthemen der Dashboard-Publikationsreihe

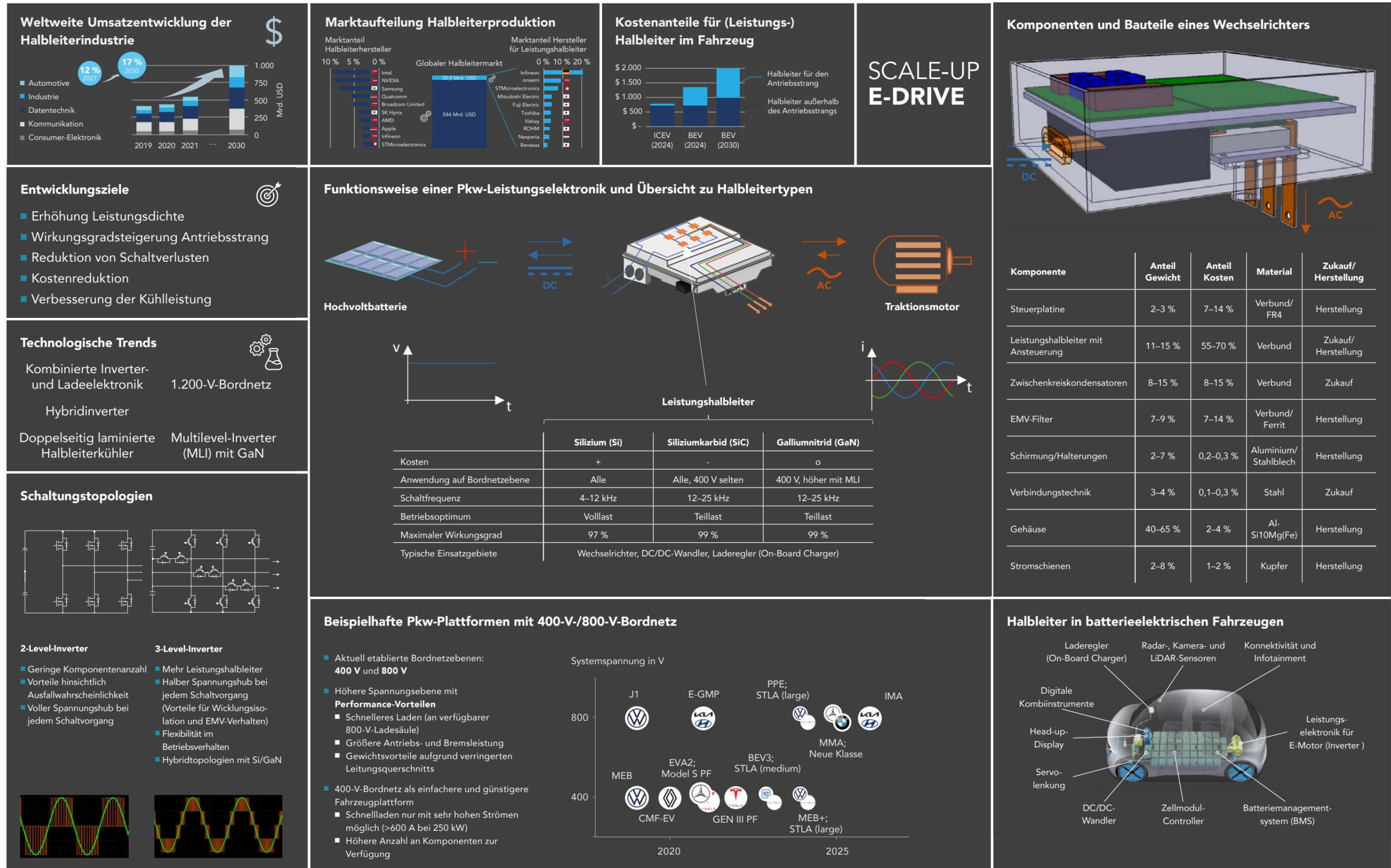


Abbildung 3: Transformations-Dashboard „Technologische Trends Leistungselektronik“

Kontakt: benjamin.frieske@dlr.de // Quellen: Deloitte (2021), DLR (2024, 2025), Infineon Technologies AG (2024), VDA (2023), ZVEI (2020, 2023)

Quelle: DLR

Einleitung und Übersicht

Die Leistungselektronik spielt eine entscheidende Rolle bei elektrifizierten Antriebssträngen, da sie die effiziente Versorgung und Steuerung elektrischer Energie ermöglicht, die für den Betrieb von Elektrofahrzeugen und deren Ladeinfrastruktur unerlässlich ist. Aufgrund des hohen Elektrifizierungsgrads von Fahrzeugkomponenten sowie der Entwicklung von Sicherheitssystemen findet sich die Leistungselektronik nicht nur in der energetischen Vernetzung wieder, also als Wechselrichter für E-Motor, Laderegler oder DC/DC-Wandler, sondern sie steuert auch die logische Vernetzung von Datensystemen und die Sensorik des Fahrzeugs, z. B. bei Radar-, Kamera- und LiDAR-Sensoren, sowie von Kombiinstrumenten und Infotainmentsystemen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch Anwendungsbereiche unterschiedlicher leistungselektronischer Komponenten auf, die in einem batterieelektrischen Fahrzeug verbaut sein können. Hauptbestandteil dieser Komponenten

sind Halbleiterelemente, die leistungsführende Schaltfunktionen in der jeweiligen Applikation übernehmen. Die höchsten elektrischen Leistungen werden zwischen Batteriespeicher und Antriebsmaschine umgesetzt. So finden sich, bezogen auf die Leistung und die Spannung in der Peripherie rund um die Batterie (Laderegler, DC/DC-Wandler) und den elektrischen Antriebsstrang samt Wechselrichter die leistungsfähigsten Halbleiter.

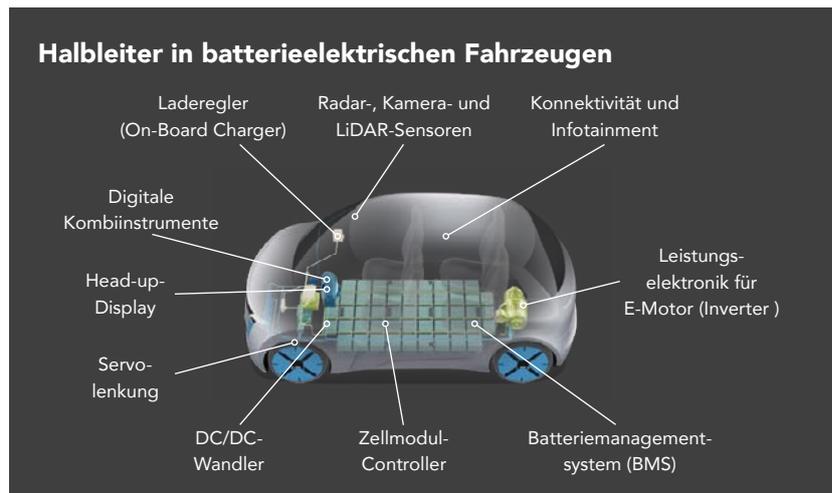


Abbildung 4: Anwendungen für Halbleiter im Pkw

Aufgrund von Digitalisierungsprozessen, der Nutzung neuer Technologien (z. B. Künstliche Intelligenz), der Weiterentwicklung von Funktionen der Konnektivität und Vernetzung (z. B. 5G) und einer steigenden weltweiten Nachfrage nach elektrifizierten Fahrzeugen erlebt und erwartet die Halbleiterindustrie ein enormes Wachstum, sodass mit einer Verdoppelung des Umsatzes bis 2030 gerechnet wird (im Vergleich zum Jahr 2020, siehe Abbildung 5). Bezogen auf die Automobilindustrie wird im gleichen Zeitraum eine nicht unerhebliche Steigerung des weltweiten Absatzanteils an Halbleitern von 12 % auf 17 % erwartet (ZVEI 2020, 2023).

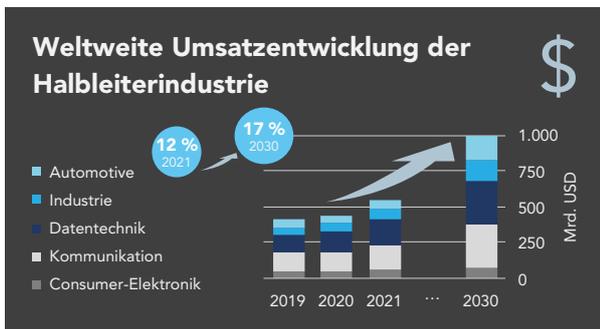


Abbildung 5: Erwartete Umsatzentwicklung der Halbleiterindustrie weltweit

Dies lässt sich unter anderem auf den verstärkten Bedarf an Halbleitern für Funktionen außerhalb des Antriebsstrangs zurückführen, wie z. B. für das automatisierte bzw. autonome Fahren oder für Konnektivitäts- und Sicherheitsfunktionen der Fahrzeuge. So hat sich in den letzten zehn Jahren die durchschnittliche Anzahl an Halbleitern in verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (engl. Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV) verdoppelt und in elektrifizierten Fahrzeugen von 570 auf 1.460 fast verdreifacht.

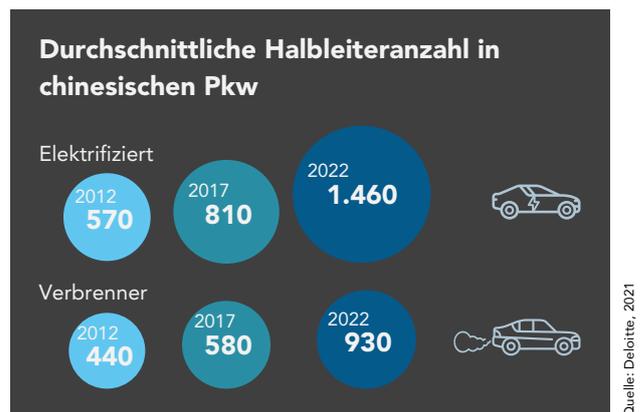
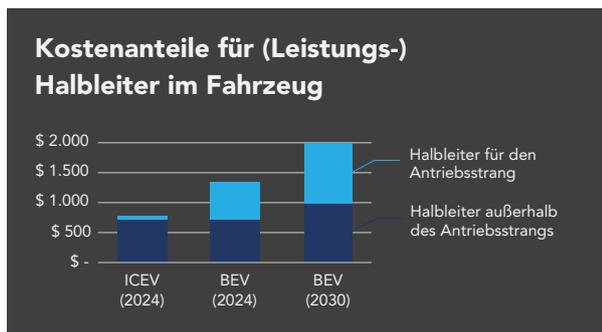


Abbildung 6: Durchschnittliche Anzahl der verbauten Halbleiter in chinesischen Pkw

Batterieelektrische Fahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicle, BEV) benötigen Halbleiter vermehrt für Funktionen des Fahrzeugantriebsstrangs. Halbleiter, die für Antriebsfunktionen sowie das Lade- und Energiemanagement verwendet werden, sind allerdings leistungs- und kostenintensiver. Dies ist ebenfalls Abbildung 7 zu entnehmen, in der die Kostenanteile für Halbleiter außerhalb des Antriebsstrangs und Leistungshalbleiter für den Antriebsstrang nach Antriebsart dargestellt sind. Dabei wird deutlich, dass die Leistungshalbleiter für den Wechselrichter zum Betrieb der E-Maschine, auch Leistungselektronik genannt, den größten Kostenanteil darstellen.



Quelle: Infineon Technologies AG, 2024

Abbildung 7: Kostenanteile für Leistungshalbleiter im Fahrzeug

Marktaufteilung der Halbleiterproduktion

Während die globale Halbleiterproduktion, vor allem für Consumer-Elektronik, Kommunikation und Datentechnik, von Firmen aus dem amerikanischen und dem südkoreanischen Raum dominiert wird, deckt die deutsche Firma Infineon, wie in Abbildung 14 dargestellt, mit über 20 % im Jahr 2022 einen großen Teil des Markts für Leistungshalbleiter ab.



Quelle: Infineon Technologies AG, 2024

Abbildung 8: Anteil des Marktes für Leistungshalbleiter am globalen Halbleitermarkt

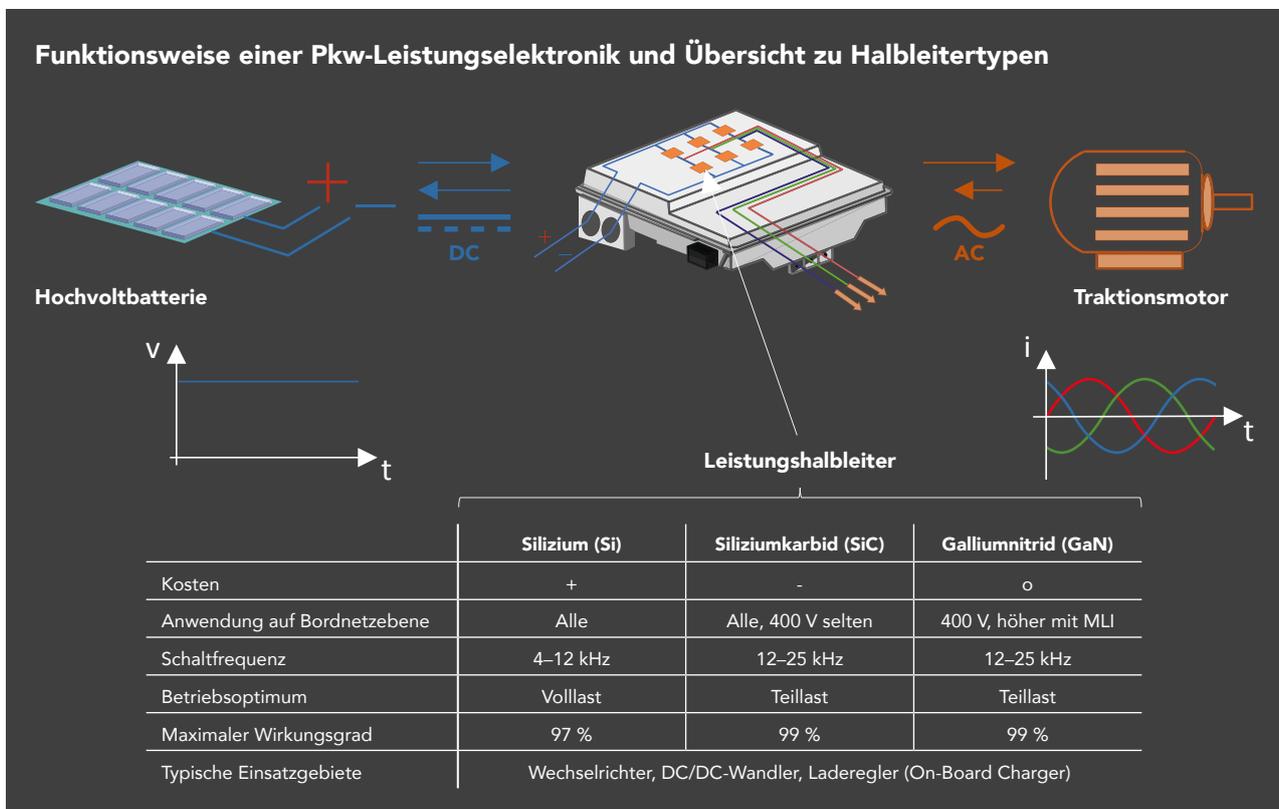
Funktionsweise einer Pkw-Leistungselektronik

Die Antriebsmotoren moderner E-Fahrzeuge sind dreiphasige Drehstrommaschinen, das heißt Synchron- und Asynchronmotoren (e-mobil BW 2023). Sie benötigen für ihren Betrieb sinusförmige Ströme unterschiedlicher Frequenz, je nach Drehzahl des Motors. Die Energieversorgung des E-Antriebs erfolgt durch eine Hochvoltbatterie (HV), die eine Gleichspannung zur Verfügung stellt. Die Aufgabe des in Abbildung 7 schematisch dargestellten Wechselrichters ist die Wandlung der Gleichspannung in eine Wechselfspannung, sodass sinusförmige Ströme durch den Motor fließen können. Um dies zu realisieren, besitzt der Wechselrichter Leistungshalbleiter, die große Ströme schalten und hohe Spannungen verkraften können. Diese Leistungshalbleiter haben zwei Zustände, in denen sie verlustarm und dadurch effizient betrieben werden können: den EIN- und den AUS-Zustand. Ein eingeschalteter Halbleiter kann Ströme sehr effizient leiten, es entstehen jedoch aufgrund des verbleibenden Widerstands im Halbleiter sogenannten Durchlassverluste, die die maximale Stromstärke im Halbleiter begrenzen. Im AUS-Zustand ist der Widerstand des Halbleiters idealerweise unendlich, in der Realität ist er zumindest sehr hoch. In diesem Zustand treten im Halbleiter keine relevanten Verluste auf. Jedoch kann ein Halbleiter nur bis zu einer gewissen Spannung standhalten. Wird die Durchbruchspannung überschritten, kommt es zu einem Stromanstieg im Halbleiter („Lawineneffekt“) und letztendlich zu dessen Zerstörung. Aus diesem Grund müssen die Leistungshalbleiter je nach Bordspannung und Stromstärke im Motor ausgewählt werden.

Um sinusförmige Ströme im Motor zu erzeugen, könnten im einfachsten Fall auch sinusförmige Spannungen genutzt werden. Dies ist mit Leistungshalbleitern jedoch nicht ohne Weiteres möglich, da diese nur die beiden verlustarmen Zustände EIN und AUS annehmen können. Aus diesem Grund werden die Halbleiter mit einer hohen Frequenz im Bereich von über 10.000 Schaltungen pro Sekunde (10 kHz) getaktet. Dabei wechseln sie ständig zwischen dem EIN- und dem AUS-Zustand. Über die Dauer, wie lange die Halbleiter ein- bzw. ausgeschaltet sind, kann der Mittelwert der Spannung eingestellt werden. Somit ist es möglich, dass der Mittelwert der Spannung einen sinusförmigen Verlauf annimmt, auch wenn die Spannung am Halbleiter ständig zwischen voller Batteriespannung und (nahezu) 0 Volt wechselt. Die Induktivität im Antriebsmotor sorgt dafür, dass der Strom in der Maschine nicht beliebig schnell ansteigen oder abfallen kann. Dadurch ist die sogenannte gepulste Spannung des Wechselrichters, die zwischen dem definierten hohen und dem niedrigen Spannungsniveau wechselt, für die Erzeugung von sinusförmigen Motorströmen ebenfalls verwendbar. Für den Stromverlauf ist der Mittelwert der Ausgangsspannung einer Impulsperiode des Wechselrichters relevant. Aufgrund des Ein- und Ausschaltens ist der Stromverlauf jedoch nicht perfekt sinusförmig. Es bildet sich ein Sägezahnmuster entlang des Sinusverlaufs aus. Je nach Induktivität des Motors und Schaltfrequenz des Wechselrichters ist dieses Muster mehr oder weniger stark ausgeprägt.

Jeder Übergang zwischen den beiden Zuständen EIN und AUS wird als Schaltvorgang bezeichnet. Da während des Schaltvorgangs die Spannung und der Strom im Halbleiter nicht gleich null sind, entstehen Verluste. Diese sogenannten Schaltverluste begrenzen die maximale Schaltfrequenz des Halbleiters. Moderne Halbleiter aus Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) können schneller und verlustärmer schalten. Aus diesem Grund sind mit diesen Halbleitern höhere Schaltfrequenzen möglich. Außerdem entstehen bei jedem Schaltvorgang auch Schaltüberspannungen am Halbleiter aufgrund von parasitären Induktivitäten im Aufbau des Wechselrichters. Diese sind der Grund, warum es zwischen der Spannungsklasse des Halbleiters und der Bordspannung eine Differenz gibt. 600-V-Halbleiter werden typischerweise an der 400-V-Bordspannungsebene betrieben, 1.200-V-Halbleiter an Bordspannungen bis 850 V.

Leistungshalbleiter aus Siliziumkarbid werden aufgrund ihrer Eigenschaften (zehnmal höhere Durchbruchfeldstärke verglichen mit Silizium) eher für höhere Spannungsebenen eingesetzt. Zudem ist die Realisierung hoher Stromstärken mit SiC-Halbleitern gut möglich, weshalb sie sich auch für Wechselrichter über 100 kW Leistung eignen. Galliumnitrid wird aktuell für Bordspannungen bis 400 V eingesetzt, wobei es auch Bestrebungen für 1.200-V-GaN-Halbleiter gibt (Fraunhofer IAF 2024; GaNPower 2021). Die Stromtragfähigkeit von aktuell verfügbaren GaN-Halbleitern liegt jedoch deutlich unter der von SiC-Halbleitern. Dafür können GaN-Halbleiter verlustärmer schalten und somit nochmals höhere Schaltfrequenzen gegenüber SiC erreichen. Aus diesem Grund ist der Anwendungsbereich von GaN eher für DC/DC-Wandler und Ladegeräte (On-Board Charger) vorteilhaft, da im Vergleich zu einem



Quelle: DLR, eigene Darstellung

Abbildung 9: Funktionsweise und Halbleitertypen einer Pkw-Leistungselektronik

System mit Siliziumhalbleitern an Bauraum und Gewicht gespart werden kann. Für die elektrische Maschine ist eine hohe Schaltfrequenz ab einer gewissen Schwelle nicht mehr von Vorteil. Zwar sinken die Verluste in der Maschine mit Erhöhung der Schaltfrequenz, jedoch wird die Wicklungsisolation stärker belastet, was zu einer Reduzierung der Lebensdauer der E-Maschine führen kann (Pauli et al. 2019). Die Charakteristik im eingeschalteten Zustand von SiC- und GaN-Halbleitern unterscheidet sich von der von Leistungshalbleitern aus Silizium (Si), z. B. bei Si-IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), die üblicherweise für Antriebswechselrichter im E-Fahrzeug eingesetzt werden. Diese unterschiedlichen Charakteristiken führen dazu, dass SiC- und GaN-Halbleiter im Teillastbereich (also bei mittleren Strömen) geringere Durchlassverluste gegenüber Si-IGBTs erzeugen. Bei Volllast sind die Durchlassverluste von Si-IGBTs mit denen von SiC- oder GaN-Transistoren vergleichbar, wobei die Durchlassverluste von Si-IGBTs in einigen Fällen sogar etwas geringer ausfallen. Entsprechend liegen die Betriebsoptima bei den unterschiedlichen Halbleitertechnologien an verschiedenen Punkten.

Es gibt verschiedene schaltungstechnische Topologievarianten zum Aufbau eines Wechselrichters für Drehfeldmaschinen. Abbildung 8 stellt die Unterschiede sowie Vor- und Nachteile der 2- und 3-Level-Inverter schematisch dar. Die am weitesten verbreitete Wechselrichtervariante ist die 2-Level-Topologie, bestehend aus sechs Leistungshalbleitern. Der Name kommt von den zwei möglichen elektrischen Potenzialen, auf die die Motoranschlüsse geschaltet werden können. Zwischen zwei Motoranschlüssen liegt entweder die volle Spannung der Traktionsbatterie von 400 oder 800 V, die als Zwischenkreisspannung in den Kondensatoren gespeichert ist, oder aber 0 V.

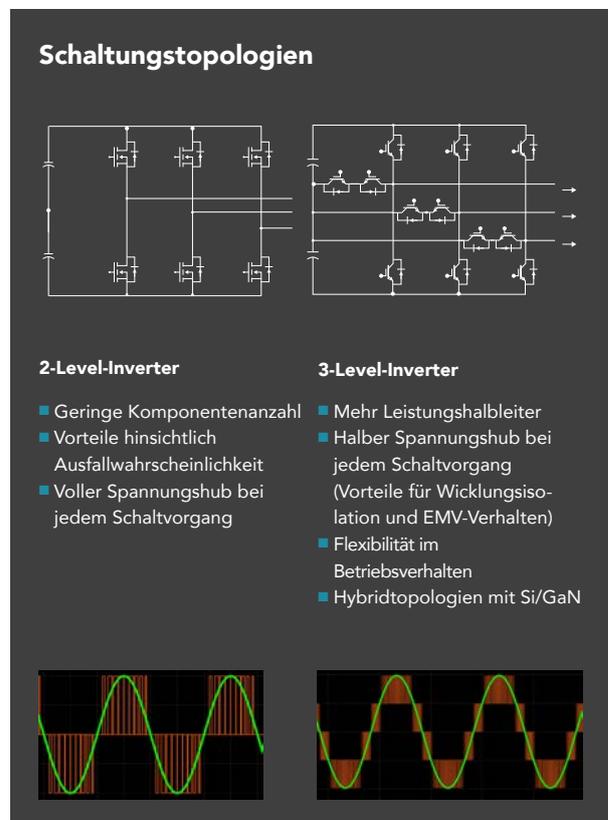


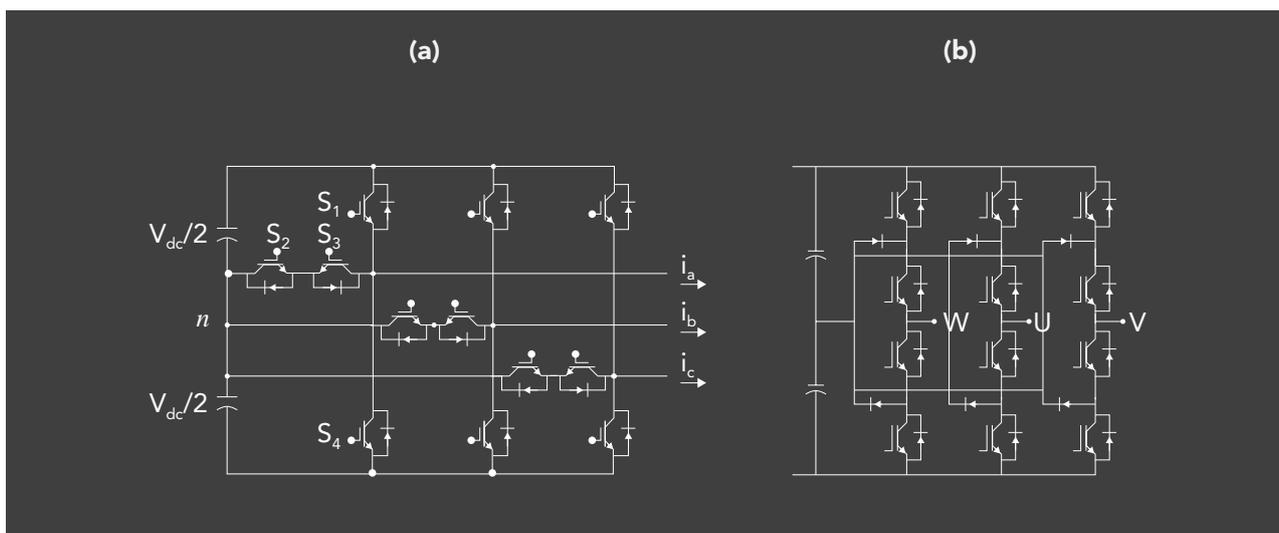
Abbildung 10: Vergleich von 2- und 3-Level-Invertern

Die Vorteile dieser Topologie liegen in der geringeren Komponentenanzahl. Der Aufwand hinsichtlich der Ansteuerung mittels Treiberschaltung über Mikrocontroller ist am geringsten. Außerdem lässt sich mit dieser Topologie eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtwechselrichters realisieren. Jede Komponente, das heißt jeder Leistungshalbleiter sowie jedes Bauteil der Treiberschaltung (Widerstände, Kondensatoren, Schaltkreise etc.), bringt eine gewisse statistische Ausfallwahrscheinlichkeit mit sich. Je mehr Komponenten benötigt werden, desto größer die Ausfallwahrscheinlichkeit des Wechselrichters bzw. desto höher die Anforderung an die Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Bauteile. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass bei jedem Schaltzustand des Wechselrichters maximal drei Halbleiter im Strompfad liegen bzw. von Strom durchflossen werden. Dadurch sind die Verluste, die aufgrund des Stromflusses entstehen – die sogenannten Durchlassverluste –, eher gering.

Vor allem bei höheren Bordnetzspannungen ergeben sich zusätzliche technische Herausforderungen bei der Verwendung von 2-Level-Wechselrichtern, da es durch das schnelle Umschalten zwischen 0 V und der vollen Zwischenkreisspannung innerhalb der Motorwicklung zu lokalen Überspannungen kommen kann (Pauli et al. 2019). Diese belasten die Wicklungsisolation zusätzlich und führen zu schnellerer Alterung des Isolationssystems. Um diesen Effekt zu begrenzen, hat sich eine maximale Steilheit des Spannungsanstiegs beim Schalten von 10–15 kV/µs als Grenze etabliert (Pai 2020). Das heißt, dass ein Wechsel von 0 auf 800 V beispielsweise in etwa 54 ns (10^{-9} Sekunden) passiert. Obwohl dies schon ein unglaublich schneller Vorgang ist, können moderne SiC-Leistungshalbleiter Spannungssteilheiten von über 50 kV/µs erreichen. Das heißt, die Halbleiter für Antriebswechselrichter schalten langsamer, als sie könnten, und verursachen dadurch zusätzliche Schaltverluste. Das schnelle Schalten einer hohen Spannung bringt noch einen weiteren Nachteil mit sich. Durch die Oberflächen der Leiter können Störungen kapazitiv angekoppelt werden. Das heißt, es kommt zu Störaussendungen, die andere elektrische Geräte negativ beeinflussen können. Um dies zu verhindern, gibt es Grenzwerte zur sogenannten Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), die nicht überschritten werden dürfen. Je größer die Spannungssteilheit und je höher die Bordnetzspannung, desto schwieriger ist es, diese Grenzwerte einzuhalten. Es muss eventuell zusätzlicher Aufwand zur Abschirmung mit Hilfe von Filterschaltungen betrieben werden.

Um diese Nachteile zu adressieren, sind 3-Level-Wechselrichter für den Antriebsstrang im Gespräch. 3-Level-Topologien können drei verschiedene Potenziale an den Motoranschlüssen realisieren. Somit ist es möglich, jeweils nur die halbe Zwischenkreisspannung über die Motorwicklung zu schalten. Dies reduziert die Belastung der Isolation und bringt Vorteile hinsichtlich des EMV-Verhaltens mit sich. Aufgrund des Schaltmusters, das (wie in Abbildung 8 dargestellt) eine bessere Übereinstimmung mit dem sinusförmigen Stromverlauf aufweist, kann bei gleicher Schaltfrequenz eine geringere Stromwelligkeit realisiert werden. Dies reduziert die Verluste im Motor und führt zu geringeren Drehmomentwelligkeiten. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Leistungshalbleiter teilweise nur auf die halbe Zwischenkreisspannung ausgelegt sein müssen. Dies ermöglicht beispielsweise auch den Einsatz von 600-V-GaN-Halbleitern bei Wechselrichtern für 800-V-Bordnetze. Untersuchungen diesbezüglich sind vielversprechend. Als mögliche erfolgversprechende 3-Level-Topologien kommen die in Abbildung 9 dargestellten „neutral-point clamped“ (NPC) Topologien T-NPC (a) und NPC (b) in Frage.

Die Nachteile von 3-Level-Topologien ergeben sich direkt aus den Vorteilen der 2-Level-Topologien: Zu den wesentlichen Nachteilen gehört die höhere Anzahl an Komponenten, die bei einer 3-Level-Topologie erforderlich ist. Dies führt zu einem größeren Aufwand bei der Ansteuerung, insbesondere durch die zusätzlichen Treiberschaltungen, die für die zusätzlichen Schaltelemente benötigt werden. Zudem steigt mit der Anzahl der Bauelemente auch die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls, was die Zuverlässigkeit der Schaltung beeinträchtigen kann. Ein weiterer Nachteil ist die erhöhte Anzahl an Halbleitern im Strompfad. Dies führt zu höheren Durchlassverlusten, da der Strom durch mehrere Schaltelemente fließt, was die Effizienz der Schaltung reduziert. Diese Faktoren machen die 3-Level-Topologie komplexer und potenziell weniger robust im Vergleich zur 2-Level-Topologie.



Quelle: DLR, eigene Darstellung

Abbildung 11: Vergleich unterschiedlicher 3-Level-„neutral-point clamped“ (NPC)-Topologien: T-NPC (a) und NPC (b)

Komponenten, Produktion und Fertigungs-kompetenzen

Kernkomponente des Wechselrichters sind die Leistungshalbleiter, die einen Kostenanteil von 55–70 % im Verhältnis zu den Gesamtkosten des Wechselrichters ausmachen. Die Leistungshalbleiter werden typischerweise in einem Gesamtmodul vom Zulieferer gefertigt. In diesem Leistungsmodul befinden sich, wie in Abbildung 10 dargestellt, beispielsweise alle sechs Transistoren in einem Gehäuse. Die Bodenplatte des Moduls besteht aus einer thermisch gut leitfähigen Metalllegierung und kann über Befestigungsbohrungen direkt an einen Kühlkörper oder einen Kühlkreislauf angeschlossen werden. Die Leistungsanschlüsse werden über Stromschienen seitlich aus dem Modul herausgeführt. Die elektrischen Anschlüsse zur Ansteuerung befinden sich an der Oberseite des Moduls. An diese Anschlüsse wird eine spezielle Ansteuerplatine montiert, die das Ein- und Ausschalten des Leistungshalbleiters ermöglicht. Da diese Prozesse im Nanosekundenbereich ablaufen, ist eine direkte Nähe zu den Leistungshalbleitern sehr wichtig. Auf der Ansteuerplatine ist eine galvanische Trennung zwischen dem HV-Bordnetz und der niedrigen Logikspannung realisiert. An der Gleichspannungsseite des Leistungsmoduls werden in direkter Nähe zueinander die Zwischenkreis-kondensatoren angeschlossen. Diese sind sehr wichtig für einen verlustar-

men Betrieb des Wechselrichters und ermöglichen impulsartige Ströme während der Schaltvorgänge der Halbleiter. Der Volumenanteil der Zwischenkreis-kondensatoren im Wechselrichter ist relativ groß, und nach dem Leistungsmodul ist dieses Modul mit 8–15 % Kostenanteil eine der teuersten Komponenten des Wechselrichters.

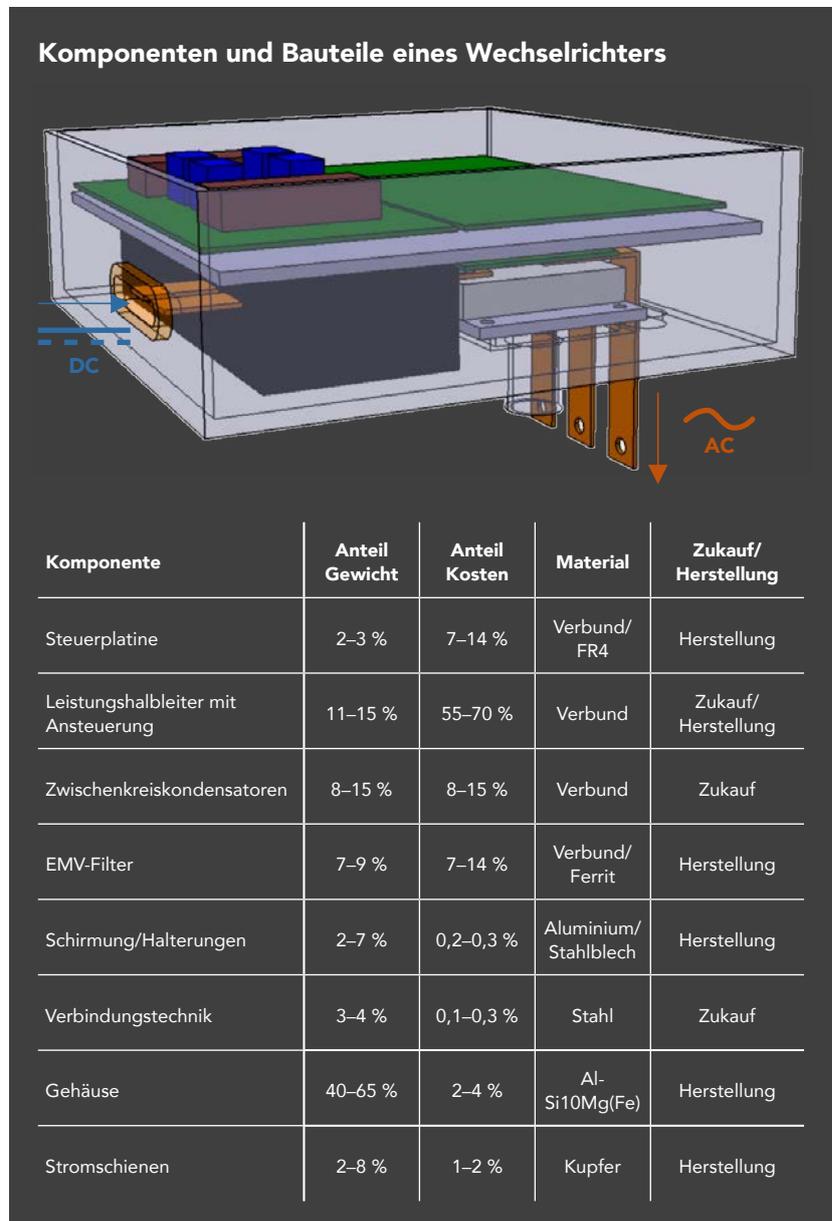


Abbildung 12: Kosten- und Gewichtsanteile der unterschiedlichen Komponenten eines Wechselrichters

Ebenfalls an das Leistungsmodul angeschlossen ist die Steuerplatine. Diese besteht aus hunderten von elektronischen Bauteilen und übernimmt verschiedene Aufgaben wie Motorregelung, Generierung der Steuerimpulse für die Ansteuerung der Leistungshalbleiter, Erzeugung verschiedener Logikspannungen (15 V, 5 V, 3,3 V) aus dem 12-V-Bordnetz, Kommunikation mit dem Fahrzeug (CAN-Bus) sowie Auswertung verschiedener Messwerte (Drehgeber, Temperatur, Zwischenkreisspannung, Motorströme etc.). Der Gewichts- und Volumenanteil der Steuerplatine ist gering, dennoch zählt sie mit einem Kostenanteil von 7–14 % neben den Zwischenkreiskondensatoren zu den teuersten Komponenten eines Wechselrichters. Sie ist auf jeden Fall die Komponente mit der größten Komplexität. Eine weitere Platine wird für die EMV-Filterung benötigt. Das impulsartige Schalten der Leistungshalbleiter führt zu Störungen, die in den Rest des Fahrzeugs abstrahlen und dort elektronische Systeme beeinträchtigen können. Um dies zu verhindern, gibt es entsprechende Grenzwerte für die Störabstrahlung. Zu ihrer Einhaltung werden EMV-Filter verwendet, die beispielsweise mit Ferriten, Kondensatoren und Widerständen bestückt sind. Es besteht auch die Möglichkeit, die verschiedenen Komponenten, wie die Ansteuerplatine, die Steuerplatine und den EMV-Filter, auf einer einzigen großen Platine zu integrieren, wie es beispielsweise beim Tesla Model 3 umgesetzt wurde. Dabei können unterschiedliche Designvarianten zum Einsatz kommen.

Zusätzlich werden im Wechselrichter noch weitere Stromschienen verwendet, um das Leistungsmodul mit dem Motor oder die Zwischenkreiskondensatoren mit dem DC-Steckanschluss zu verbinden. Außerdem gibt es Komponenten zur mechanischen Befestigung der Platinen, die teilweise auch als elektromagnetische Abschirmung des Leistungsmoduls dienen. Es werden verschiedene Schrauben verwendet, um alle Komponenten miteinander zu verbinden und mechanisch zu fixieren.

Die mit 3,5–7 kg größte und schwerste Komponente des Wechselrichters ist das Gehäuse, wobei dessen Kostenanteil an den Gesamtkosten des Wechselrichters mit 2–4 % eher gering ist. Als Material hierfür wird eine typische Aluminiumlegierung für den Automobilbereich verwendet.

Entwicklungsziele



- Erhöhung Leistungsdichte
- Wirkungsgradsteigerung Antriebsstrang
- Reduktion von Schaltverlusten
- Kostenreduktion
- Verbesserung der Kühlleistung

Quelle: DLR, eigene Darstellung

Abbildung 13: Ziele der Leistungselektronikentwicklung

Technologie, Trends und Entwicklung

Antriebswechselrichter sind hinsichtlich des Spitzenwirkungsgrads und der Leistungsdichte bereits hochgradig optimiert. Potenzial besteht bezüglich des Wirkungsgrads im Teillastbereich: Hier bieten SiC- und GaN-Transistoren Vorteile gegenüber IGBTs (Beaurenaut 2017). Dies steht jedoch im Gegensatz zum Ziel einer Kostenreduktion, da die Verwendung dieser Leistungshalbleiter im Allgemeinen mit höheren Kosten verbunden ist. Verschiedene Ansätze, wie beispielsweise der Multilevel-Wechselrichter zur kombinierten Nutzung von GaN-Transistoren und IGBTs, sollen zur Lösung dieses Zielkonflikts beitragen (hofer powertrain 2024; Lu und Di Maso 2020).

Technologische Trends	
Kombinierte Inverter- und Ladeelektronik	1.200-V-Bordnetz
Hybridinverter	
Doppelseitig laminierte Halbleiterkühler	Multilevel-Inverter (MLI) mit GaN



Quelle: DLR, eigene Darstellung

Manche Trends hinsichtlich der Leistungselektronik sind auf externe Bedingungen zurückzuführen. So existiert derzeit ein Trend zum immer schnelleren Laden der HV-Batterie im Fahrzeug. Dies wird mit höherer Bordnetzspannung tendenziell einfacher, da die Leiterquerschnitte der Ladeinfrastruktur und der DC-Leitungen im Fahrzeug kleiner ausgeführt werden können. So hat sich beispielsweise in der Vergangenheit ein Trend vom 400-V- zum 800-V-Bordnetz bei Fahrzeugplattformen mit höheren Anforderungen an Leistung und Reichweite ergeben. Abbildung 13 zeigt beispielhaft verschiedene Pkw-Plattformen internationaler Fahrzeughersteller, aufgeteilt nach Spannungsebene. Typische Beispiele für Fahrzeuge mit 800-V-Bordnetz sind der Porsche Taycan, basierend auf der J1-Plattform der VW AG und der Hyundai Ioniq 5, basierend auf der E-GMP des Hyundai-Kia-Konzerns. Zukünftige rein batterieelektrische Fahrzeuge der BMW AG auf Basis der sogenannten „Neuen Klasse“ sowie Fahrzeuge der Mercedes-Benz AG auf der MMA-Plattform werden ebenfalls mit 800-V-Bordnetz debütieren. Tesla dagegen setzt bei seinen Pkw-Plattformen Model S sowie Model III weiterhin auf den 400-V-Standard.

Abbildung 14: Technologische Trends in der Leistungselektronik

Aktuelle Ausschreibungen und Förderprojekte der EU befassen sich bereits mit Spannungen von mehr als 800 V, konkret in Richtung 1.200 V (Europäische Kommission 2023). Dies erfordert notwendige Anpassungen im Design von Antriebswechselrichtern, bei denen sich insbesondere Multilevel-Topologien als vorteilhaft erweisen. Auch finden Untersuchungen dazu statt, wie beispielsweise der Antriebswechselrichter als Ladeelektronik benutzt werden kann, um die Abwärtskompatibilität zu 400-V- und 800-V-Ladesäulen bei Einführung einer 1.200-V-Spannungsebene herzustellen (Europäische Kommission 2024).

Zu erwähnen ist auch, dass es bereits viele Bestrebungen gegeben hat, die Leistungselektronik weiter in die elektrische Maschine zu integrieren und somit Gewicht und Bauraum einzusparen. Bei diesen Ansätzen handelt es sich um verteilte leistungselektronische Systeme, die Segmente des Stators bzw. auch nur einzelne Spulen ansteuern. Die Platzierung der Leistungselektronik erfolgt dabei im Lagerschild, an den Stirnseiten des Blechpaketes oder entlang der Außenkontur des Stators (Fraunhofer IISB 2014; BMBF 2022). Als besondere Herausforderungen sind hier das Thermomanagement sowie der Verbindungsaufwand zwischen den leistungselektronischen Teilsystemen zu nennen.

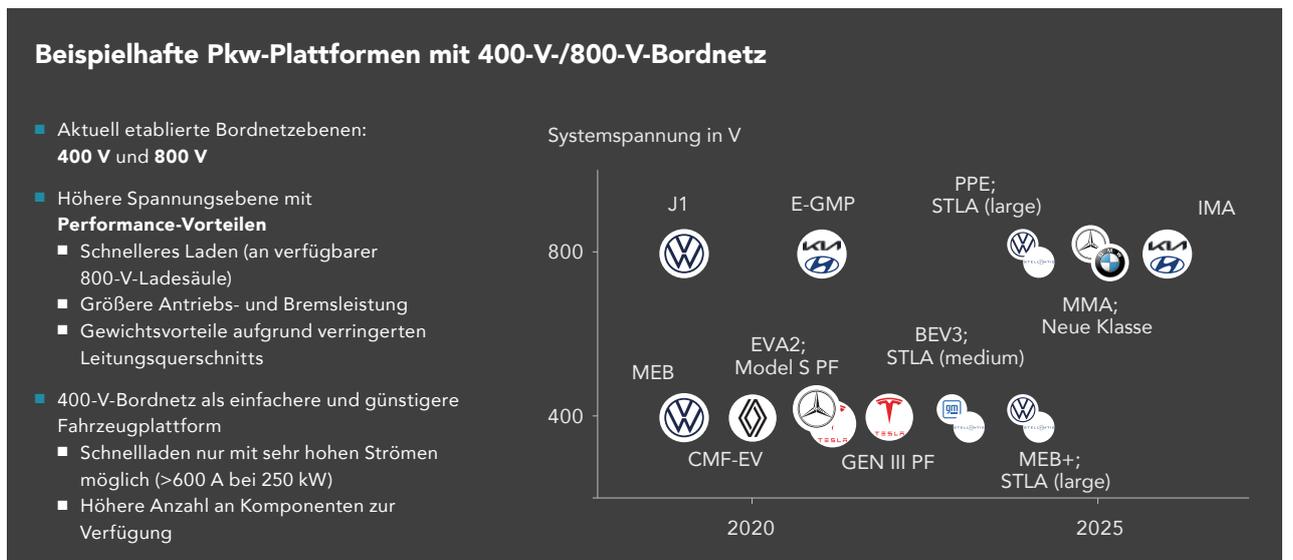


Abbildung 15: Vergleich von Fahrzeugplattformen mit unterschiedlicher Systemspannung

Literatur

Beaurenaud, Laurent (2017):

SiC für die Automobilelektronik: Hocheffizient und leistungsstark. Infineon Technologies AG. emobility tec. Online verfügbar unter https://www.infineon.com/dgdl/emobility-tec_0117_100317_Laurent_Beaurenaud.pdf?fileId=5546d4615ba9e11d015bc902a6780709, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

BMBF (2022):

Elektrische Antriebsmaschine mit in das Lagerschild integrierter Siliziumcarbid-Leistungselektronik. Online verfügbar unter <https://www.elektronikforschung.de/projekte/lasic>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

e-mobil BW (Hg.) (2023):

Transformations-Factsheet „Technologische Trends E-Motor“. Unter Mitarbeit von Samuel Hasselwander, Benjamin Frieske, Hagen Spielmann und Michael Nankemann.

Europäische Kommission (2023):

Integration and testing of next generation post-800V electric powertrains (2ZERO Partnership). HORIZON-CL5-2024-D5-01-02. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/horizon-cl5-2024-d5-01-02>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Europäische Kommission (2024):

Ultra-Efficient Highly-Integrated 1200V Powertrains for Electric Vehicles Enabling Next-Gen Charging Speeds and Compatibility Across Charger Generations (GEN1200): Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/how-to-participate/org-details/999999999/project/101191866/program/43108390/details>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Fraunhofer IAF (2024):

1200-V-GaN-HEMTs für die Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.iaf.fraunhofer.de/de/medien/pressemitteilungen/1200-v-gan-hemts-energiewende.html>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Fraunhofer IISB (2014):

EMiLE – Electric motor integrated power electronics with Smart Stator Teeth. Online verfügbar unter https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/vehicle_electronics/EMiLE-Electric-Motor-Integrated-Power-Electronics_FraunhoferIISB_1V3_WWW.pdf, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

GaNPower (2021):

GaNPower Demonstrates Industry's First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices. Online verfügbar unter <https://iganpower.com/ganpower-demonstrates-industrys-first-1200-v-single-die-e-mode-gan-power-devices>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

hofer powertrain (2024):

hofer powertrain and VisiC Technologies push the efficiency limits with 3-Level 800V GaN inverter. Online verfügbar unter <https://www.hoferpowertrain.com/articles/hofer-powertrain-and-visic-technologies-push-the-efficiency-limits-with-3-level-800v-gan-inverter>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Lu, Juncheng; Di Maso, Peter (2020):

GaN enables efficient, cost-effective 800V EV traction inverters. Online verfügbar unter <https://www.edn.com/gan-enables-efficient-cost-effective-800v-ev-traction-inverters/>, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Pai, Ajay Poonjal (2020):

Leistung, Robustheit, Kosten: Leistungshalbleiter-Technologien für die Elektromobilität. 02/2020. Infineon Technologies AG. emobility tec. Online verfügbar unter https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Leistungshalbleiter-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46273a5366f0173b960f8162db1, zuletzt geprüft am 09.12.2024.

Pauli, Florian; Yang, Ligu; Schröder, Michael;

Hameyer, Kay (2019):

Lebensdauerabschätzung von Wicklungsisolierstoffsystemen in SiC-betriebenen elektrischen Niederspannungsmaschinen. In: Elektrotech. Inftech. 136 (2), S. 175–183. DOI: 10.1007/s00502-019-0711-2.

ZVEI (2020):

Entwicklung der Halbleiterindustrie 2020. ZVEI-Presskonferenz, 3. Dezember 2020, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2020-099_Halbleitermarkt_schafft_weltweit_moderates_Wachstum/ZVEI-PK-20201203_Halbleiter_final.pdf, zuletzt geprüft am 07.08.2024.

ZVEI (2023):

Halbleiter für Europa – Trends, Chancen und Herausforderungen. Verband der Elektro- und Digitalindustrie. ZVEI-Pressgespräch am 28.02.2023. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2023_012_EU_Chips_Act/Pressekonferenz-Halbleiter-230228-final.pdf, zuletzt geprüft am 07.08.2024.

Hintergrund

Das Projekt „Transformations-Hub Scale-up E-Drive“ wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Mit dem Transformations-Hub Scale-up E-Drive werden insbesondere kleine und mittlere Unternehmen befähigt, neue Technologietrends aufzunehmen, geeignete Partner zu finden und sich neue Geschäftsfelder zu erschließen. Dafür wird der bundesweit agierende Hub vorwettbewerbliche und fachspezifische Inhalte vermitteln sowie neue Chancenfelder in Bezug auf den elektrischen Antriebsstrang aufzeigen und durch gezielte Vernetzung neue Kooperationen initiieren.

Die Publikationsreihe „Transformations-Factsheet“ bereitet aktuelle Trends und Entwicklungen zu Branchen-, Markt-, Technologie-, Produkt- und Produktionswissen in kompakter Form auf und ordnet diese in den internationalen Kontext ein.

SCALE-UP E-DRIVE

Herausgeber

Transformations-Hub Scale-up E-Drive
c/o e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45, 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-43
hub-edrive@e-mobilbw.de



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages