

48-Volt-Bordnetz – Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität



Impressum

48-Volt-Bordnetz – Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Fachverband Electronic Components and Systems und
Fachverband PCB and Electronic Systems
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-276

Fax: +49 69 6302-407

E-Mail: zvei-be@zvei.org

www.zvei.org

Verantwortlich:

Hans-Martin Fischer, ZVEI

Dr. Reiner Korthauer, ZVEI

Autoren:

Jürgen Bilo, Continental
Dr. Heinz-Georg Burghoff, Horegulus Consulting
Humberto dos Santos, TDK Europe
Jürgen Engbring, Leoni Bordnetz Systeme
Edmund Erich, Delphi
Peter Gresch, OptE GP Consulting
Frank Harrmann, Leoni Kabel
Dr. Thomas Heckenberger, Mahle Behr
Norbert Hees, Kostal
Istvan Hegedüs-Bite, ZF Friedrichshafen
Dr. Helmut Kalb, Leoni Kabel
Dr. Matthias Kriegel-Gemmecke, NSG
Dr. Christian Kuper, Johnson Controls
Antonio Leone, Freescale
Dr. Marc Nalbach, Hella
Bernd Piller, Continental
Hans Rechberger, Webasto
Norbert Schnocks, Continental
Richard Schöttle, Robert Bosch
Hans-Joachim Schröder, Brose
Ulrike Sinner, Valeo
Waldemar Stabroth, TE Connectivity
Joachim Weitzel, Infineon
Michael Günther Zeyen, vancom

Dezember 2015

Trotz größtmöglicher Sorgfalt übernimmt der ZVEI keine Haftung für den Inhalt. Alle Rechte, insbesondere die zur Speicherung, Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, sind vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	4
1.1 CO ₂ -Grenzwert, Diskussion und Ergebnisse	5
1.2 Rückblick auf die 42-Volt-Diskussion im Jahr 2000	6
1.3 Hybrid-Markt – Darstellung/Tendenzen	7
1.4 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	9
1.5 VDA-Empfehlung 320	10
1.6 Weitere technische Herausforderungen	11
2. Architekturen	15
2.1 Antriebsstrang	15
2.2 Verschiedene Bordnetztopologien	17
3. Komponenten	19
3.1 Generatoren und Motoren	19
3.2 Heizung und Zusatzheizer	20
3.3 Klimakompressoren	21
3.4 Pumpen	22
3.5 Frontscheibenheizung	22
3.6 Chassis-Funktionen	24
3.7 Lüftermotoren	25
3.8 Verbindungssysteme	26
3.9 Leitungssätze	27
3.10 Inverter	28
3.11 DC/DC-Wandler	28
3.12 Energie- und Batteriemangement	29
3.13 Aktive elektronische Bauelemente	30
3.14 Passive Bauelemente	33
4. Fazit und Ausblick	36
5. Abkürzungsverzeichnis	37

1. Einführung

Die CO₂-Grenzwerte der Europäischen Kommission stellen für die Automobilindustrie eine Herausforderung dar, die mit konventionellen Verbrennungsmotoren allein nicht mehr oder kaum noch zu erreichen ist. Notwendig wird der Einsatz alternativer Antriebskonzepte, die es ermöglichen, die CO₂-Emissionen im Flottenverbrauch drastisch zu senken.

Heutige Hybridfahrzeuge erfüllen diesen technischen Anspruch, sind aber in der Anschaffung preislich noch nicht attraktiv genug. Das ist vor allem darauf zurück zu führen, dass die Funktion des elektrischen Antriebs mit Spannungen oberhalb der 60-Volt-Grenze (noch zulässige Berührungsspannung) realisiert wird und damit entsprechend hohen technischen Aufwand im Bereich der Sicherheit erfordert.

Die neue 48-Volt-Spannungsebene (Bild 1) eröffnet die Möglichkeit, Hybridisierung günstiger zu realisieren. Die Entwicklung dieser Mehrspannungsarchitekturen im Fahrzeug bedarf der detaillierten Untersuchung aus System- sowie aus Komponentensicht.

Dem entsprechend wurde neben den beiden Spannungsebenen 12/24 Volt und Hochvolt (> 60 V) eine dritte Ebene 48 Volt definiert, die hauptsächlich dazu dienen soll, den CO₂-Ausstoß durch Rekuperation und Start-Stopp-Funktion zu reduzieren sowie elektrische Aggregate mit hoher Leistung (wie z. B. Klimakompressoren, elektrische Heizer, Pumpen, Lenkungsantriebe) zu betreiben. Darüber hinaus steigert der Einsatz der 48-Volt-Technik die Leistung und Fahrdynamik des Antriebs („Boosten“).

Architektur:

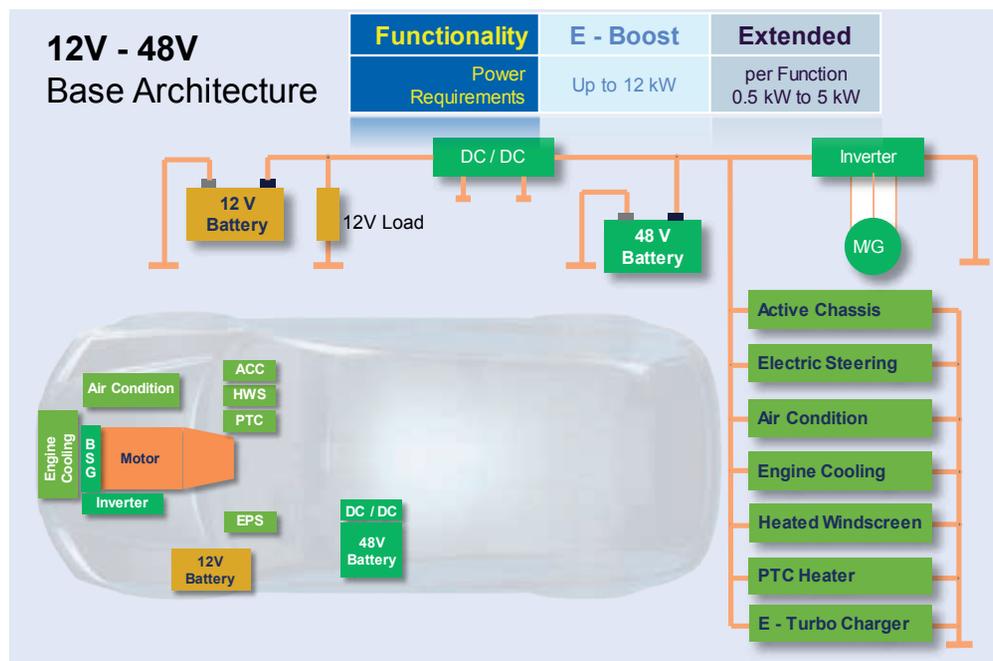


Bild 1: Basis-Architektur – Quelle: Delphi

1.1 CO₂-Grenzwert, Diskussion und Ergebnisse

Weltweit wird in vielen Ländern versucht, die durch den Straßenverkehr verursachten CO₂-Emissionen über entsprechende Festlegungen zu regulieren (Bild 2). Für Pkw sind Grenzwerte festgelegt, die je nach Region in ihrer absoluten Höhe zwar unterschiedlich sind, jedoch sämtlich für die nächsten Jahre erhebliche Reduktionen fordern.

„Mit einem Anteil von ca. 26 Prozent trägt der Verkehr erheblich zu den CO₂-Gesamtemissionen in der EU bei. Der Pkw-Verkehr ist dabei mit ca. 12 Prozent für nahezu die Hälfte der Emissionen verantwortlich“¹. So ist in Europa für alle neu zugelassenen Pkw ein Grenzwert von 95 g CO₂ pro km ab dem Jahr 2021 vorgesehen. Das entspricht einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von ca. 4 l/100 km (Benziner) bzw. 3,6 l/100 km (Diesel). Für die Jahre nach 2021 werden weitere Reduktionen diskutiert. Ab dem Jahr 2050 sollen neue Pkw keinerlei CO₂-Emissionen mehr aufweisen. Die europäische Regelung sieht eine Fahrzeuggewichtskomponente vor. Der Grenzwert von 95 g CO₂/km gilt nur für ein Fahrzeug mit der „Normmasse“ von 1.350 kg. Schwerere Fahrzeuge dürfen etwas mehr, leichtere etwas weniger CO₂ emittieren.

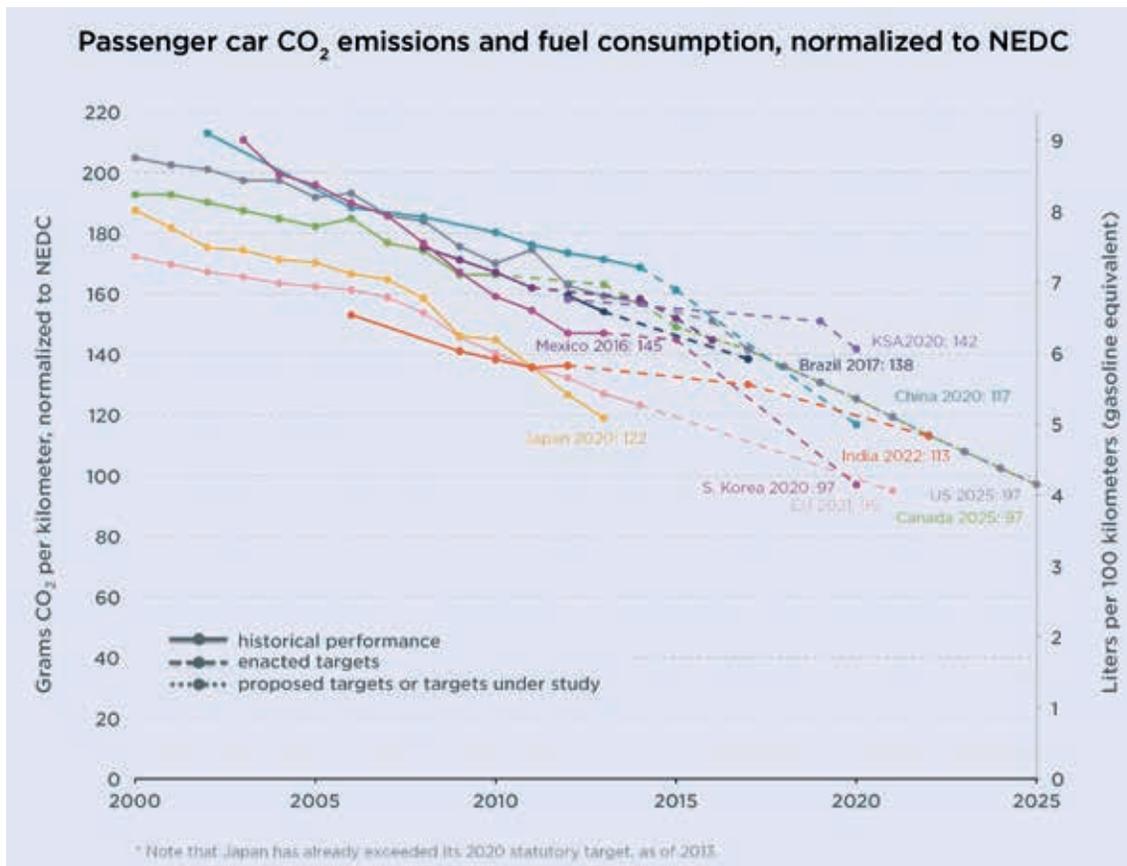


Bild 2: Internationale CO₂-Ziele – Quelle: The International Council for Clean Transportation

1 BMU, Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen

Zur Einhaltung der bereits festgelegten als auch der kommenden Grenzwerte muss die Fahrzeugindustrie erhebliche Anstrengungen unternehmen. Allen Akteuren ist bewusst, dass innermotorische Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors allein nicht zum Ziel führen werden. Vielmehr müssen zur Zielerreichung weitere Maßnahmen umgesetzt werden. Hierzu zählen verbesserte Aerodynamik, Leichtbau, Leichtlaufreifen, LED-Licht, effizientere Getriebe (vielgängige automatische Getriebe mit Doppelkupplung) und die Elektrifizierung von Nebenaggregaten. So wird beispielsweise die Wasserpumpe bzw. der Klimakompressor vom Direktantrieb durch den Verbrennungsmotor auf eine bedarfsabhängige elektrische Antriebsform umgestellt.

Besonderes Augenmerk gilt der Einführung eines 48-Volt-Starter-Generators, die eine „Boost-Funktion, Segeln“ sowie eine gegenüber dem 12-Volt-Bordnetz deutlich gesteigerte Rekuperationsfähigkeit ermöglicht.

1.2 Rückblick auf die 42-Volt-Diskussion im Jahr 2000

Anfang der 90er Jahre entspann sich in den Vorentwicklungsabteilungen der Fahrzeughersteller eine Diskussion über eine höhere Bordnetzspannung, die zur Gründung des internationalen 42-Volt-Konsortiums führte, in dem die Automobilhersteller und -zulieferer vertreten waren. Ziel war es, ein 42-Volt-Bordnetz an Stelle des 12-Volt-Bordnetzes in die Pkw-Welt einzuführen. Das 42-Volt-Netz war eigentlich ein 36-Volt-Netz, verfügte über eine 36-Volt-Batterie und damit über eine Spannung, die dreimal höher war als das konventionelle 12-Volt-Netz. Die Spannung von 36/42 Volt wurde gewählt, um unter Berücksichtigung aller Toleranzen im Bordnetz eine Spannung von unter 60 Volt sicherzustellen und so den teuren Berührungsschutz zu vermeiden. Um das Innovative an dieser Lösung zu verdeutlichen, wurde jedoch das neue Bordnetz nach der Reglerspannung und nicht nach der Batteriespannung benannt.

Zunächst sprachen einige Gründe dafür: So wurden wegen ständig zunehmenden elektrischen Verbrauchern und entsprechend steigendem Energiebedarf Generatoren mit höherer Leistung als erforderlich angesehen, was nach damaligen Vorstellungen nur durch eine Spannungserhöhung zu erreichen war. Auch kurzfristig deutlich höhere Leistungsbedarfe von weit über einem kW – wie z. B. bei einer elektromagnetischen Ventilsteuerung – waren auf 12-Volt-Basis nicht zu realisieren. Schließlich sprachen die durch Umweltvorgaben erforderlich werdenden Start-Stopp-Systeme zur Emissionsreduktion sowie die mit 42 Volt verbundenen geringeren Kabelquerschnitte und der damit einhergehenden Gewichtsverminderung dafür.

Im weiteren Verlauf der 90er Jahre kam diese Lösung, abgesehen von zwei Automobilmodellen in Japan und USA, nicht flächendeckend zur Anwendung, da den damit einhergehenden Mehrkosten keine erhöhte Funktionalität gegenüberstand. Denn mittlerweile kamen im 12-Volt-Bereich Generatoren von über drei kW auf den Markt, Systeme mit extrem hohem Leistungsbedarf wurden nicht wie erwartet angeboten. So wurde z. B. die elektromagnetische Ventilsteuerung nicht eingeführt. Start-Stopp-Systeme auf 12-Volt-Basis gewannen an Boden. Damit entfiel das Erfordernis einer höheren Spannung.

Die seit 2011 auflebende 48-Volt-Diskussion erfolgt einen auf den ersten Blick ähnlichen, letztlich aber schwerpunktmäßig unterschiedlichen Ansatz. Das 48-Volt-Bordnetz (48 Volt = vierfache Nennspannung gegenüber 12 Volt) wird als Ergänzung nicht als Ersatz des 12-Volt-Netzes propagiert. Die Berührungsschutzgrenze von 60 Volt ist allerdings auch hier die bestimmende Größe.

Hauptmotivation zur Einführung einer weiteren Bordnetzspannung sind dieses Mal die erwähnten gesetzlichen Vorgaben der EU, die einen durchschnittlichen Grenzwert von 95 g CO₂/km für Pkw ab 2021 vorsehen. Die beim Überschreiten des Grenzwertes anfallende Strafzahlung rechtfertigt auch den Einsatz relativ teurer Maßnahmen. Mit dem 48-Volt-Netz kann ein Start-Stopp-System zu einem Mild Hybrid mit merklicher Rekuperationsleistung, Boosten und Segeln ausgebaut werden. Das führt zu einer Verbrauchs- und Emissionsenkung bis zum unteren zweistelligen Prozent-Bereich.

Um die EU-Vorgaben zur CO₂-Reduzierung und zum Flottenverbrauch ab 2021 erfüllen zu können, haben mittlerweile die meisten europäischen Automobilhersteller entschieden, die 48-Volt-Technik einzuführen (Bild 3).

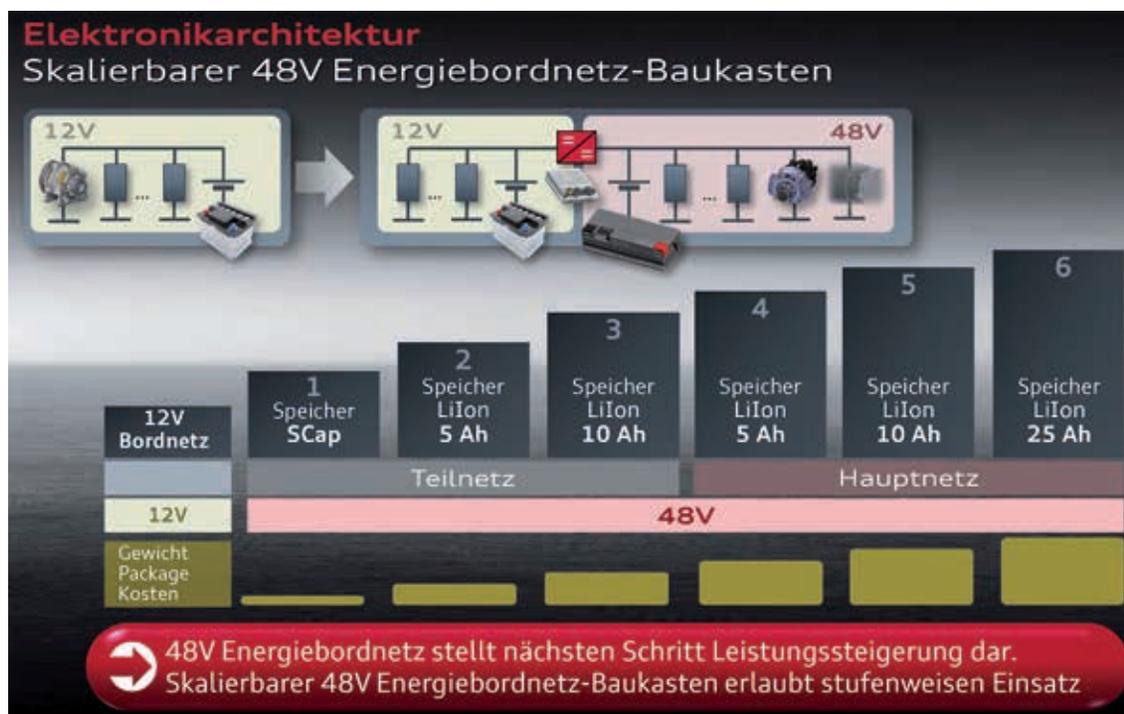


Bild 3: Skalierbarer Baukasten zur Einführung des 48-Volt-Bordnetzes – Quelle: Audi

1.3 Hybrid-Markt – Darstellung/Tendenzen

So lange die Kosten-Nutzen-Rechnung für die große Mehrzahl der Autokäufer nicht aufzugehen scheint, bleibt die Frage: Wie kann eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs in großen Stückzahlen zur Senkung des CO₂-Ausstoßes beitragen?

Auf absehbare Zeit wird es in den meisten Flotten ein Nebeneinander von Start-Stopp-, 48-Volt- und Hochvolt-Elektrifizierung geben. Weltweit zeichnet sich eine starke Tendenz hin

zu Plug-in-Hybriden ab. In China allerdings sind insbesondere reine Elektrofahrzeuge gefragt. Bei der 48-Volt-Technologie, die noch ihren Entwicklungsschwerpunkt in Europa hat, zeichnet sich ab, dass viele Autohersteller inzwischen die Vorteile des 48-Volt-Systems erkannt und weltweit entsprechende Programme gestartet haben.

Dabei stehen entsprechend leichte und einfach zu integrierende Lösungen im Vordergrund, um hohe Investitionen zu vermeiden, die Komplexität gering zu halten und eine einfachere

Wartung sicherzustellen. Das gilt insbesondere für die volumenrelevante Kompakt- und Mittelklasse (Bild 4), die unter hohem Kostendruck steht. Im einfachsten Fall wird die Lichtmaschine durch einen Riemen-Starter-Generator (RSG) ersetzt, der durch die 48-Volt-Spannung mit höherer Effizienz arbeitet und den Verbrennungsmotor extrem schnell, geräusch- und vibrationsarm startet. Bei Bedarf wird der Verbrennungsmotor im Rahmen der Fahrstrategie elektromotorisch unterstützt, um sein Ansprechverhalten zu verbessern. Hierbei kann ein zusätzliches Drehmoment abgerufen werden. Dabei ergänzt in der Regel eine 48-Volt-Batterie die 12-Volt-Starter-Batterie. Jene wird im Rekuperationsbetrieb während den Verzögerungsphasen über den RSG geladen.

Mit diesen Komponenten lässt sich ein großer Teil der Funktionalität umsetzen, die bisher aus Hybrid-Systemen mit deutlich höherer Spannung bekannt sind. So ergibt sich eine CO₂-Emissionsreduzierung bei Hochvolt-Hybriden von ca. 20-25 Prozent CO₂/km, während 48-Volt-Mild-Hybride heute nach ersten Erkenntnissen bei etwa 10-15 Prozent CO₂/km Reduzierung liegen. Vergleicht man die Zusatzkosten, so zeigen sich die Kosten der 48-Volt-Mild-Hybride bei nur 30-50 Prozent im Vergleich zu Hochvolt-Hybriden. Damit ist das 48-Volt-System eine sinnvolle, insbesondere bezahlbare Ergänzung zu den Voll- und Plug-in-Hybriden. Darüber hinaus ist ein 48-Volt-System einfacher an bestehende Antriebsstränge und Fahrzeugarchitekturen zu applizieren – es werden weniger umfangreiche Eingriffe vorgenommen. Dadurch wird erwartet, dass die Einführung der 48-Volt-Spannungsebene sich zügig im Markt etabliert.



Bild 4: Fahrzeuge der Mittel- und Kompaktklasse sind die Volumentreiber – Quelle: Continental

Das zusätzliche 48-Volt-Bordnetz bietet neben der Hybridisierung auch die Möglichkeit, ausgewählte elektrische Verbraucher im Fahrzeug mit einer höheren Spannung zu betreiben. Dies ist von Relevanz, da die Anzahl der elektrischen Verbraucher, insbesondere in der Mittel- und Oberklasse, weiter stark zunimmt. Weiterhin führt es zu einer generellen Entlastung des 12-Volt-Bordnetzes und gleichzeitig zu einer höheren Effizienz der Hochleistungsverbraucher, wenn diese mit einer höheren Spannung betrieben werden.

Marktprognosen sehen bis 2025 25 Prozent der neu zugelassenen Fahrzeuge mit einem elektrifizierten Antriebsstrang (Bild 5), wobei nahezu die Hälfte mit 48-Volt-Technologie ausgestattet wäre. Ab dem Jahre 2020 könnte sich ein Potential von ca. vier Millionen 48-Volt-Systemen weltweit entwickeln.

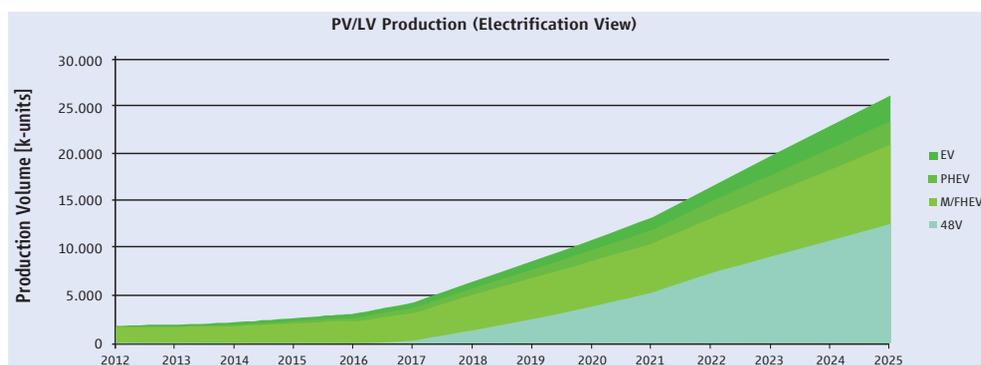


Bild 5: Marktentwicklung elektrifizierter Antriebe bis 2025 – Quelle: Continental

1.4 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Neben einer ganzen Reihe von technischen Herausforderungen wird die Einführung des 48-Volt-Bordnetzes vor allem von einer intensiven Diskussion über dessen Wirtschaftlichkeit begleitet. Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits herausgearbeitet wurde, sind die entscheidenden Treiber für die Einführung des 48-Volt-Bordnetzes einerseits die stetig wachsenden Leistungsanforderungen der Nebenaggregate, andererseits aber vor allem die Möglichkeiten zur weiteren Reduzierung des CO₂-Ausstoßes.

Die Mehrkosten für ein 42-Volt-Bordnetz wurden Anfang des letzten Jahrzehnts mit ca. 600-1.000 Euro gegenüber einem leistungsgesteigerten 12-Volt-Bordnetz veranschlagt. In dieser Größenordnung dürften, je nach Ausbaustufe, auch heute noch die Mehrkosten für ein 48-Volt-Bordnetz liegen (Starter-Generator, Leistungselektronik, Batterie, Leistungsverteilung). Unterstellt man die gegebene Notwen-

digkeit zur Einführung eines 48-Volt-Bordnetzes (Stichwort CO₂), so bleibt unter dem Strich die Erkenntnis, dass Mehrkosten unvermeidbar sind.

In Anbetracht der hohen R&D-Aufwendungen und der erheblichen Fertigungskosten werden die Stückzahlen der 48-Volt-Komponenten von entscheidender Bedeutung sein. Nur wenn es gelingt, das 48-Volt-Bordnetz auf breiter Front einzuführen, werden sich die erforderlichen Skaleneffekte einstellen. Während die 48-Volt-Batterie durchaus von der Zellenproduktion für die Antriebsbatterien der BEVs (Battery Electric Vehicles) profitiert, sieht die Entwicklung bei den Nebenaggregaten umgekehrt aus: Hier könnte sich das 48-Volt-Bordnetz zum eigentlichen Treiber entwickeln.

Gängig ist bei BEVs heute der Einsatz von speziell entwickelten Hochvolt-Komponenten, etwa Klimakompressoren und elektrischen Heizungen. Deren Entwicklung und Herstellung ist

aufgrund der Anforderungen an die elektrische Sicherheit sehr aufwendig. Diese Aggregate können in aller Regel auch nur einen begrenzten Hochvolt-Spannungsbereich abdecken, beispielsweise 250 bis 450 Volt. Die Entwicklung der Hochvolt-Bordnetzspannung schreitet voran, bereits in absehbarer Zeit ist mit der Einführung von Spannungen über 800 Volt zu rechnen. Eine solche Spannungslage würde bei vielen Hochvolt-Nebenaggregaten de facto auf eine komplette Neuentwicklung und noch höhere Stückkosten hinauslaufen.

Auch wenn der Gedanke an ein Dreispannungsbordnetz aus wirtschaftlicher Sicht zunächst abschrecken mag, so liegt gerade darin ein großes Potential. Die Kosten für ein 48-Volt-Aggregat liegen signifikant unter dem seines Hochvolt-Pendants. Leistungen bis fünf kW, ggf. auch höher, sind mit der verfügbaren Technik durchaus beherrschbar. Die Ausführung liegt in der Regel deutlich näher an den 12 bzw. 24 Volt Varianten, als an der Hochvolt-Version. Das trifft auch auf die Kosten zu. Sollten sich im Hochvolt-Netz mittelfristig sehr unterschiedliche Spannungslagen etablieren, so wird die Nutzung von Komponenten aus dem 48-Volt-Baukasten zunehmend interessanter. Diese Entwicklung käme den BEVs und 48-Volt-Hybriden gleichermaßen zu Gute.

Bis dahin wird jedoch noch einige Zeit vergehen. Zunächst sind grundsätzliche Fragen zur Architektur zu klären. Der systemische Ansatz ist längst noch nicht zu Ende gedacht und wird sich über die kommenden Jahre stetig weiter entwickeln. Sicher ist jedoch, dass dem 48-Volt-Bordnetz nur dann eine dauerhafte Zukunft beschieden ist, wenn es gelingt, wesentliche Komponenten zu standardisieren und die Stückzahlen rasch und signifikant zu steigern.

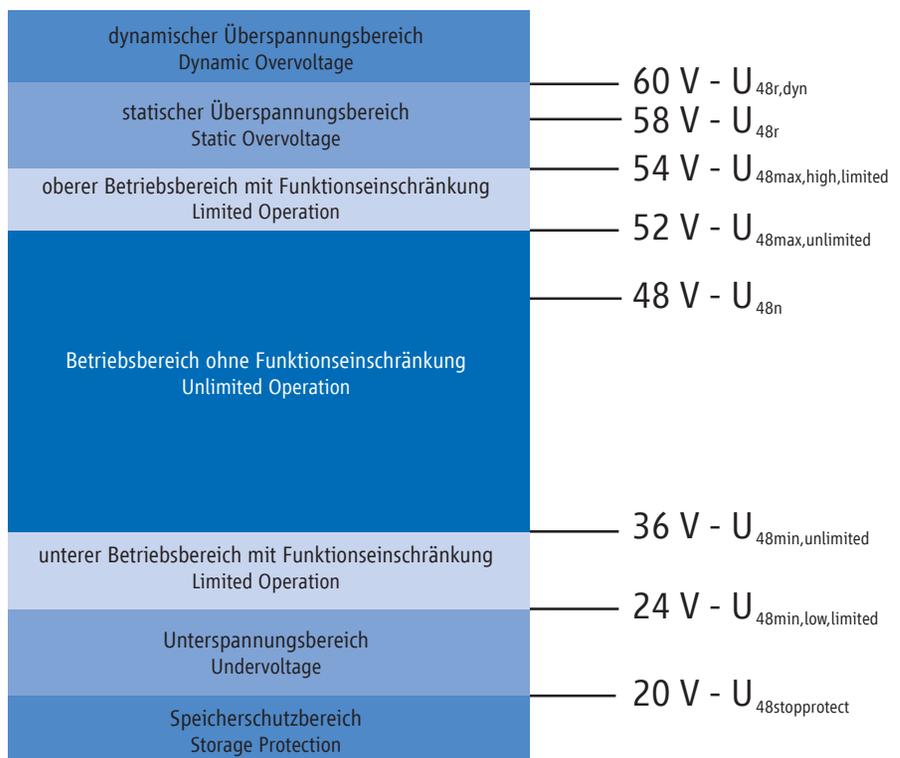
1.5 VDA-Empfehlung 320

In der VDA-Empfehlung 320 werden elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug für die Entwicklung eines 48-Volt-Bordnetzes behandelt. Sie wurde im VDA-Arbeitskreis „Elektronik, Projektgruppe VDA-48-Volt-Bordnetz“ erarbeitet.

Es werden die Anforderungen für die Prüfbedingungen und Prüfungen an elektrische, elektronische und mechatronische Komponenten und Systeme für den Einsatz in Kraftfahrzeugen mit 48-Volt-Bordnetzen definiert. Die Prüfungen sind, soweit nicht anders vermerkt, keine elektrischen Lebensdauerprüfungen.

Die Spannungen werden wie folgt definiert (Bild 6: Auszug aus der VDA 320):

Bild 6: Definitionen der Spannungsbereiche –
Quelle: VDA 320, Stand Juli 2014



Der Bereich zwischen U_{48r} und $U_{48r,dyn}$ beinhaltet die Toleranz.

Oberer Betriebsspannungsbereich mit Funktionseinschränkung

Der Bereich zwischen $U_{48max,unlimited}$ und $U_{48max,high,limited}$ ist für die Kalibrierung des Speichers und die Aufnahme von Rückspeiseenergie vorgesehen.

Betriebsspannungsbereich ohne Funktionseinschränkung

Der Bereich zwischen $U_{48min,unlimited}$ und $U_{48max,unlimited}$ lässt den Betrieb der Komponenten ohne Funktionseinschränkung zu.

Unterer Betriebsspannungsbereich mit Funktionseinschränkung

Der Betrieb im Bereich von $U_{48min,low,limited}$ bis $U_{48min,unlimited}$ ist nur temporär zulässig. Gegenmaßnahmen sind zu ergreifen, um in den Betriebsspannungsbereich ohne Funktionseinschränkung zurückzukehren.

Unterspannungsbereich

Alle Spannungen unter $U_{48min,low,limited}$ sind als Unterspannung definiert. Bei $U_{48stopprotect}$ befindet sich die Speicherschutzspannung.

Speicherschutzbereich

Alle Spannungen unter $U_{48stopprotect}$

Allgemeine Anforderungen

Prämissen an Komponenten mit BN48-Anschluss

- Es treten statische Gleichspannungen ≤ 60 V mit einer Bordnetzwelligkeit von maximal zehn Prozent RMS auf.
- Ein Einfachfehler im Leitungssatz darf nicht zu einem Kurzschließen des BN48 auf den BN12/BN24-Bereich führen.
- Es gibt eine gemeinsame Masse zwischen BN12/BN24 und BN48, die über räumlich getrennte Massebolzen/-anschlüsse verbunden sind.
- Alle Spannungs- und Stromangaben beziehen sich auf die Komponente (Klemmenspannung).
- Eine Verpolung des BN48-Systems ist durch geeignete Maßnahmen im Fahrzeug ausgeschlossen.

- Ein BN48-Fremdstart ist durch geeignete Maßnahmen im Fahrzeug ausgeschlossen.

Anforderungen an Komponenten mit BN48-Anschluss

- Ein Einfachfehler darf zu keinem Kurzschluss zwischen BN48 und BN12/BN24 führen.
- Komponenten mit gleichzeitiger BN48-Versorgung und BN12-/BN24-Versorgung oder Schnittstellen auf BN12-/BN24-Basis benötigen einen eigenen Masseanschluss für beide Versorgungsbereiche. Diese Masseanschlüsse sind räumlich voneinander zu trennen.
- Der Masseverlust einer BN48 Komponente (Kl. 31 und/oder Kl. 41) darf nicht zur Störung bzw. Zerstörung von Kommunikationsnetzwerken und der elektrischen Netzwerke führen.
- Überstromprüfungen sind in den Komponentenlastenheften zu spezifizieren.
- Keine Komponente darf zu einem Eintritt in den dynamischen Überspannungsbereich führen (z. B. durch einen Load Dump oder durch Resonanzüberhöhungen).
- Beim Eintritt in den Überspannungsbereich bis U_{48r} sind durch die rückspeisenden/verursachende Komponente Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um den Überspannungsbereich nach unten zu verlassen.
- Beim Eintritt in den unteren Betriebsspannungsbereich mit Funktionseinschränkung sind Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um in den Betriebsspannungsbereich ohne Funktionseinschränkung zurückzukehren.

1.6 Weitere technische Herausforderungen

Sicherheitsmaßnahmen

Technisch gesehen adressiert die 48-Volt-Spannungsebene im Wesentlichen das, was um die Jahrtausendwende in Richtung 42-Volt-Standardisierung erarbeitet wurde. Aus heutiger Sicht eine gute Entscheidung, da man die damaligen Erkenntnisse zum großen Anteil übernehmen kann und sich weiterhin unterhalb der noch zulässigen Berührspannung (< 60 Volt) bewegt, was aufwendige Personenschutzmaßnahmen wie Berührschutz, Potentialausgleich und Isolationsüberwachung überflüssig macht. Trotzdem gilt es bei 48 Volt den Effekt des „Hot

Plugging“ zu beachten, da das Trennen eines Stromkreises unter Last die Steckkontakte unmittelbar zerstören kann. Hier stehen Sicherheitsmaßnahmen zur Verfügung, die entweder das Trennen unter Last unmöglich machen oder vorab das Trennen detektieren und somit das rechtzeitige Abschalten der Stromkreise ermöglichen. Zudem spielt die EMV aufgrund hoher Schaltströme eine signifikante Rolle. Vereinzelt werden daher 48-Volt-Stromkreise mit geschirmten Leitungen ausgeführt. Im Vergleich zu Hochvolt-Systemen birgt die 48-Volt-Spannungsebene kein Verletzungsrisiko. Daher kann hier auf aufwendige Sicherheitsmaßnahmen für den Personenschutz verzichtet werden.

- **48 Volt Energieverteiler und Leistungsverteilung**

Vergleicht man die 48-Volt-Versorgungsspannung mit der 12-Volt-Spannungsebene, sind neben der unterschiedlichen Spannung einige technisch wesentliche Unterschiede zu verzeichnen.

Während unter 12-Volt-Bedingungen das Trennen eines Stromkreises unter Last nur eine ganz geringe Lichtbogenbildung erzeugt, würde ein Trennvorgang mit 48 Volt Lichtbögen freisetzen, die an den Kontaktstellen zu ganz erheblichen thermischen Zerstörungen führen können. Insbesondere schleichende Kurzschlüsse führen zwangsläufig zu großen Lichtbogenenergien, die durch herkömmliche Schmelzsicherungen nicht abgeschaltet werden.

Daher reichen die heute eingesetzten Schmelzsicherungen allein nicht aus, um sicher alle Fehlerquellen im 48-Volt-Bordnetz zu detektieren und sicher abzuschalten. Zusätzlich zu den Schmelzsicherungen muss deshalb eine elektronische Sensierung der Stromkreise erfolgen, die schleichende Kurzschlüsse und Lichtbogenbildung erfasst und die betroffenen Kreise im Fehlerfall abschaltet.

Da zurzeit die Anzahl der 48-Volt-Lasten noch überschaubar ist, werden die Lastkreise direkt an die Leistungselektronik angeschlossen und in dieser überwacht. Mit zunehmender Anzahl der 48-Volt-Hochleistungsverbraucher werden elektrische Energieverteiler notwendig werden, die zusätzlich zu den Schmelzsicherungen die Strompfade elektronisch überwachen und im Fehlerfall auch schleichende Kurzschlüsse erfassen und sicher abschalten. Darüber hinaus ist im Fahrzeug sicherzustellen, dass beide 48/12-Volt Bordnetze nicht in Berührung kommen. Ein 48/12-Volt-Kurzschluss würde alle 12-Volt-Steuergeräte und Lasten erheblich schädigen.

Aus der VDA-Empfehlung 320 ergibt sich, die jeweiligen Energieverteilungen räumlich voneinander zu trennen sowie im Fahrzeug ein separates Routing und separate Massepunkte der Leitungssätze zu wählen. Zur sicheren Erkennbarkeit sollten die 48-Volt-Komponenten farblich eindeutig markiert werden.

- **Lichtbögen²**

Mit der Einführung höherer Spannungslagen jenseits der 12 Volt steigt wie dargelegt das physikalisch bedingte Risiko der Ausbildung von Lichtbögen an lastführenden Trennstellen im Bordnetz. Ungewollte Unterbrechungen in Steckverbindungen oder in Leitungen sind gleichermaßen betroffen, wie die gewollte herbeigeführte Isolation von elektrischen Kontakten in Relais.

2 Tschierse, Dietmar: „Was Relais im neuen 2-Spannungsbordnetz leisten müssen“. In: Elektronik Praxis 20, 20 Okt.2014. Automotive Electronics // Bordnetz Seite 50-53. Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg.
URL: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/automotive/articles/463717/>
[Stand: 24.11.2014]

Die Lichtbogenbildung (Bild 7) unterliegt dabei folgender Wirkweise:

- Das Auseinanderstreben der beiden Leiter bei einer Trennung bedingt vor der Öffnung eine Verringerung der Kontaktkraft an der Sollbruchstelle und erzeugt eine Erhöhung des Kontaktübergangswiderstandes in der Kontaktzone.
- Bildung einer thermischen Schmelzbrücke (die Kontaktstelle beginnt sich zu öffnen: durch die erhöhte elektrische Feldstärke beginnt das Material zu schmelzen).
- Durch die weitere Vergrößerung des Kontaktpaltes erhitzt sich die Schmelzbrücke immer weiter, bis die Siedespannung des Kontaktmaterials erreicht ist.
- Dadurch bildet sich ein Metaldampfbogen / Anodenbogen / Kathodenbogen (sobald beim Öffnen die materialabhängige Bogenzündspannung erreicht wird, entsteht ein Lichtbogen).
- Ein Gas / Plasmabogen bildet sich aus.
- Wenn nachfolgend keine Maßnahmen zur Lichtbogenlöschung vorgenommen werden – wie weitere Vergrößerung des Kontaktabstandes oder Nutzung von magnetbestückten Löschkammern – entstehen sehr hohe Temperaturen im Lichtbogen, die dann thermische Zerstörungen im Umfeld hervorrufen können.

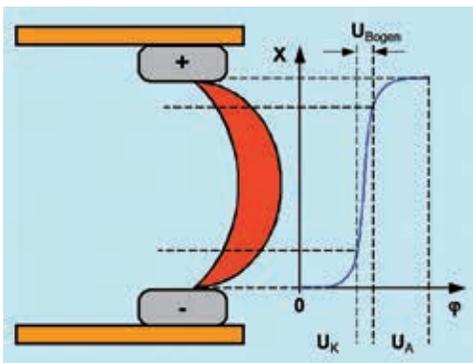


Bild 7: Potentialverlauf eines Lichtbogens zwischen zwei Elektroden
– Quelle: TE Connectivity

Direkt nach dem Zünden des Lichtbogens steht die Anoden-Kathodenfallspannung über den sich öffnenden Kontakten an. Die Lichtbogenspannung steigt linear mit der Öffnungsstrecke zwischen den Elektroden, bis es beim Einlauf in das Löschesystem zum steilen Anstieg der Bogenspannung kommt. Der Strom wird durch den Schaltlichtbogen begrenzt und zu Null gezwungen. Der Lichtbogen erlischt und über den Kontakten steht die volle Bordspannung an.

Bisher sind die Schaltaufgaben mit Relais bei Bordspannungen von 12 Volt und 24 Volt im Kfz und Nfz gut beherrschbar. Im 48-Volt-Bereich ergeben sich neue Herausforderungen. Mit den herkömmlichen 12-Volt-Relais kann es beim Schalten prinzipiell zur Ausbildung stabil brennender Gleichstromlichtbögen kommen. Dies hängt in erster Linie vom Kontaktabstand ab: Ist er zu klein, kann der Stromkreis beim Öffnen der Kontakte nicht unterbrochen werden und der nicht verlöschende Lichtbogen zerstört das Relais.

• Lastgrenzkurve

Zur Beurteilung des Schaltvermögens eines Relais wird gewöhnlich eine Abschätzung anhand der sogenannten Lastgrenzkurve 2 durchgeführt. Sie gibt die Laststrom-Lastspannungs-Paare an, bei denen ein sicheres Abschalten für den ohmschen Fall gewährleistet ist.

In Bild 8 ist die Lastgrenzkurve eines Schaltrelais K (mit Einfachkontakten) und Schaltrelais K-B (mit Brückenkontakt) für ohmsche Belastung dargestellt. Werte unterhalb der

jeweiligen Lastgrenzkurve bedeuten, dass der Lichtbogen innerhalb einer Lichtbogendauer von maximal zehn ms sicher erlischt. Oberhalb der Lastgrenzkurve spricht man vom stehenden Lichtbogen, das heißt auch bei voll geöffneten Kontakten kommt es zu keiner Löschung des Bogens.

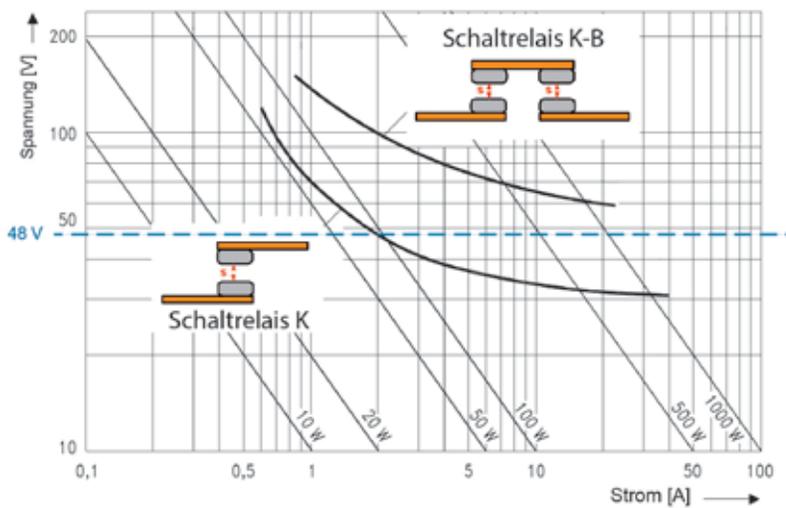


Bild 8: Lastgrenzkurve für Schaltrelais K-B und Schaltrelais K –
Quelle: TE Connectivity

Reicht zur Gleichstromabschaltung eine Einfachunterbrechung bei gegebenem Kontaktabstand nicht aus, so stehen verschiedene konstruktive Maßnahmen zur Vergrößerung der Lichtbogenspannung zur Verfügung:

- Vergrößerung des Kontaktabstandes
- Mehrfachunterbrechung (z. B. Brückenkontakt: Aufteilung des Lichtbogens in mehrere serielle Teillichtbögen)
- Verlängerung der Lichtbogensäule durch spezielle Elektrodenform (z. B. klassische Hörner) mit/ohne zusätzliche Isolierstege
- Löschblechkammer: Aufteilung des Lichtbogens in mehrere Teillichtbögen (Addition der Spannungsabfälle mehrerer Fallgebiete: Deion-Prinzip). Hierbei wird der Lichtbogen in die Löschbleche von entsprechend konstruierten Löschblechkammern getrieben und aufgeteilt, wodurch sich dessen Spannungsbedarf ebenfalls vervielfacht.
- Kühl- bzw. Isolierstoffkammern (Kühlung des Lichtbogens).

2. Architekturen

2.1 Antriebsstrang

Die mechanische Anbindung und Integration der 48-Volt-E-Maschine (bei 48-Volt-Technik meist ein Starter-Generator) im Triebstrang sowie die Wahl des Typs der 48-Volt-E-Maschine führt zu unterschiedlichen Antriebsstrang-Topologien. Die Wahl der Antriebsstrang-Topologie hat einen erheblichen Einfluss hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Ausprägung, mit der die oben angedeuteten Funktionen umgesetzt werden können sowie der damit verbundenen Kosten. Aktuell werden vier wesentliche Antriebsstrang-Topologien bei Fahrzeugherstellern und Zulieferern untersucht und bewertet. Unterschiede aufgrund der Anordnung der E-Maschine bestehen unter anderem im Potenzial der Rekuperation sowie der verfügbaren elektrischen Boost-Leistung.

Während in der Topologie nach Bild 9 der Verbrennungsmotor und die E-Maschine nicht getrennt werden können und damit sowohl im Rekuperationsbetrieb als auch im elektrischen Fahrbetrieb die Reibleistung des Verbrennungsmotors immer als Verlustleistung in Erscheinung tritt, kann in den Topologien nach Bild 11 und 12 die Verbrennungsmaschine abgekoppelt werden. Damit erhöht sich die potenziell rekuperierbare elektrische Leistung bzw. verringert sich die benötigte elektrische Leistung für eine gewünschte Fahrfunktion.

Das Gleiche ist prinzipiell auch in der Topologie nach Bild 10 möglich, sofern eine zusätzliche Kupplung zwischen Verbrennungsmotor und 48-Volt-E-Maschine eingebracht wird (P2-Hybrid).

ICE mounted (e.g. belt) – mHEV

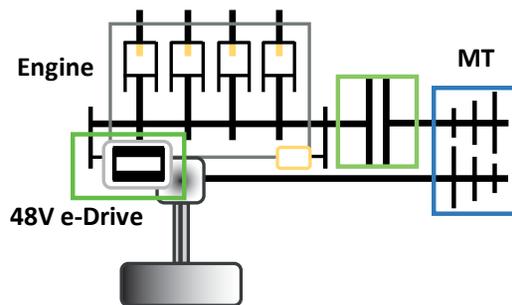


Bild 9: 48V-E-Maschine im Riemenantrieb – Quelle: Robert Bosch

Crankshaftmounted (ISG) – mHEV

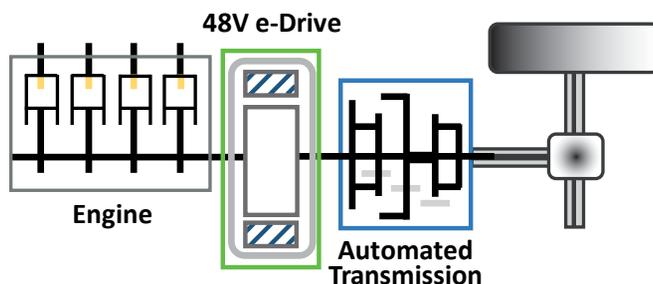


Bild 10: 48 Volt-E-Maschine auf der Kurbelwelle – Quelle: Robert Bosch

Die Einführungszeitpunkte sowie die Priorisierung der jeweiligen Topologien unterscheiden sich zwischen den unterschiedlichen Herstellern. Sie sind abhängig von dem jeweils erforderlichen Aufwand, die vorgegebenen CO₂-Zielwerte zu erreichen, von den regionalen Anforderungen und vom Funktionsangebot an den Endkunden.

Die einfachste Integration der E-Maschine und bisher am weitreichendsten untersuchte Topologie ist in Bild 9 dargestellt.

Transmission mounted (eDCT) – sHEV

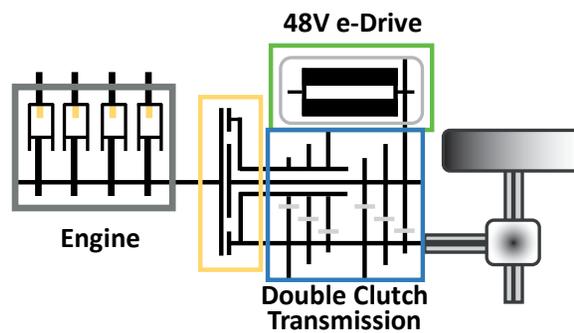


Bild 11: 48-Volt-E-Maschine am Doppelkupplungsgetriebe – Quelle: Robert Bosch

Transmission mounted (eMT/eAMT) – sHEV

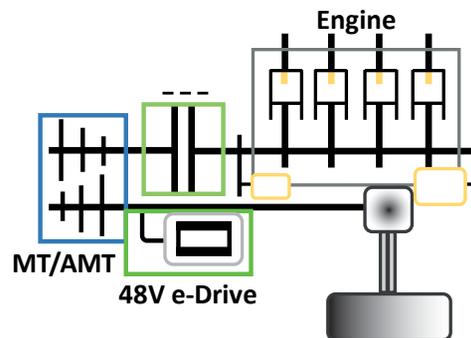


Bild 12: 48-Volt-E-Maschine am Getriebeausgang – Quelle: Robert Bosch

2.2 Verschiedene Bordnetztopologien

Die Auslegung der Bordnetze ist durch den Maximal- und den Dauerstrom bestimmt. Das 12-Volt-Bordnetz wird bis auf weiteres stets mit einem Bleiakkumulator versehen sein, da dieser selbst bei sehr niedrigen Temperaturen noch Energie für einen Startvorgang des Verbrennungsmotors liefern kann. Darüber hinaus ist er seit Jahrzehnten bewährt und kostengünstig.

Die Stromgrenze ist für beide Bordnetze bei 250 Ampere Dauerstrom anzusetzen. Kurzfristig können die Ströme auch bedeutend höher sein. Die Querschnitte der Kabel werden bei höheren Dauerströmen unhandlich groß. Dies führt zu hohen Kosten. Da das 48-Volt-Bordnetz im wesentlichen Hochleistungsverbraucher versorgt, wird es zurzeit in den meisten Anwendungen beim Ruhezustand des Fahrzeugs abgeschaltet.

- **Klassisches 12-Volt-Bordnetz**

Im klassischen 12-Volt-Bordnetz fließt der Maximalstrom beim Start des Verbrennungsmotors. Dieser Strom muss komplett von der 12-Volt-Bleibatterie geliefert werden. Bei laufendem Verbrennungsmotor speist der Generator das Bordnetz, wobei Ströme bis 350 Ampere vorkommen. Die Bordnetzspannung beträgt dann 14 Volt (Bild 13 und 14):

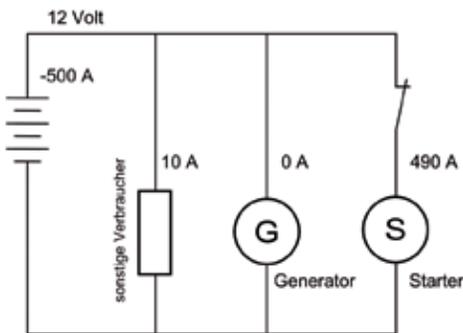


Bild 13: 12-Volt-Startvorgang – Quelle: Leopold Kostal

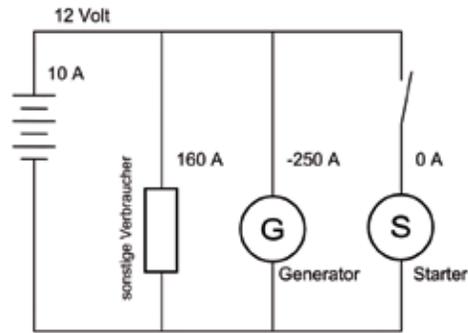


Bild 14: 12-Volt-Volllast – Quelle: Leopold Kostal

- **12-Volt-Bordnetz mit Verbrauchern höherer Spannung**

Für die Versorgung von Scheinwerfern und Frontscheibenheizungen werden bereits höhere Spannungen in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Diese Verbraucher erzeugen ihre jeweils benötigte Spannung lokal selbst (Bild 15).

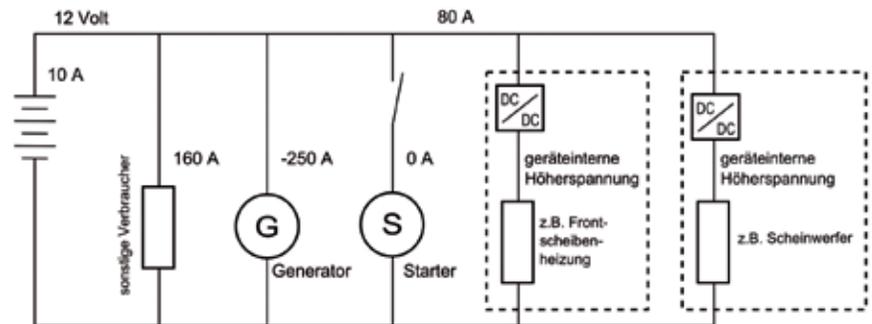


Bild 15: 12-Volt-Bordnetz mit Höherer Spannung – Quelle: Leopold Kostal

- **12-Volt-Bordnetz mit 48-Volt-Insellösung**

Bei Systemen mit kurzzeitig hohem Leistungsbedarf, wie Wankstabilisierungen oder elektrischen Turboladern, wird die 12-Volt-Spannung per DC/DC-Wandler auf 48 Volt hoch gesetzt. Auf dieser höheren Spannungsebene befindet sich dann ein Energiespeicher, der die Leistungsspitzen abdeckt, um den Generator auf der 12-Volt-Seite und den DC/DC-Wandler zu entlasten. Die Systemkomponenten und die Verkabelung können dann kleiner als bei Auslegung dieser Applikation auf die 12-Volt-Bordnetzspannung dimensioniert werden. Der DC/DC-Wandler kann unidirektional sein.

Als elektrische Energiespeicher kommen neben Batterien auch Kondensatoren in Frage. Die 12-Volt-Bleisäurebatterie versorgt nach wie vor den Motorstart (Bild 16).

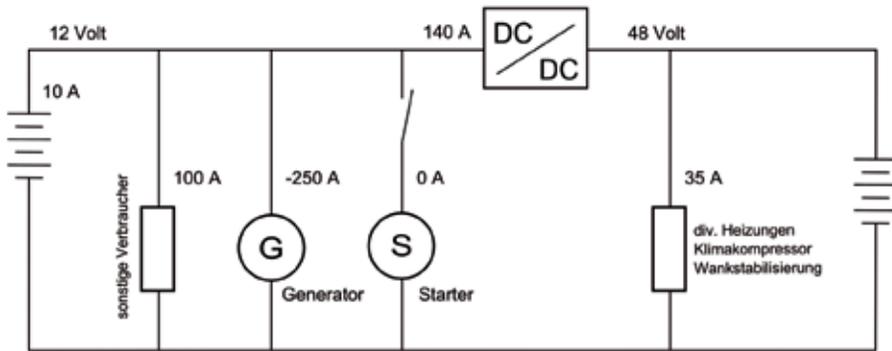


Bild 16: 12-Volt-Bordnetz mit Generator und 48-Volt-Bordnetz ohne Generator – Quelle: Leopold Kostal

• **12-Volt-Bordnetz in Kombination mit 48-Volt-Bordnetz**

Der Start des Verbrennungsmotors erfolgt für gewöhnlich aus der Lithium-Ionen-Batterie im 48-Volt-Bordnetz. Der Starter-Generator ist eine geregelte elektrische Maschine, deren Leistungsaufnahme beim Motorstart per Elektronik begrenzt wird. Bei laufendem Verbrennungsmotor kann der Starter-Generator nach heutigem Stand bis zu 15 kW in das

48-Volt-Bordnetz speisen. Per DC/DC-Wandler wird ein Teil dieser Leistung ins 12-Volt-Bordnetz übertragen, um dessen Verbraucher zu versorgen und die Bleibatterie aufzuladen (Bild 17).

In dieser Bordnetz-Topologie befinden sich die großen Verbraucher auf der 48-Volt-Seite, der Leistungstransfer zur 12-Volt-Seite könnte sich auf ein kW beschränken. Doch sind die Lithium-Ionen-Batterien bei extrem niedrigen Temperaturen nicht mehr in der Lage genügend Strom für den Motorstart zu liefern, wodurch dann die 12-Volt-Bleibatterie wieder zum Zuge kommt und entweder einen herkömmlichen Starter im 12-Volt-Bordnetz antreibt oder über einen bidirektionalen DC/DC-Wandler den BSG im 48-Volt-Bordnetz (Bild 18).

Nach einer Übergangsphase wird in den Mild-Hybriden der Starter auf der 12-Volt-Seite vermutlich entfallen und sich die zuletzt gezeigte Bordnetz-Topologie durchsetzen.

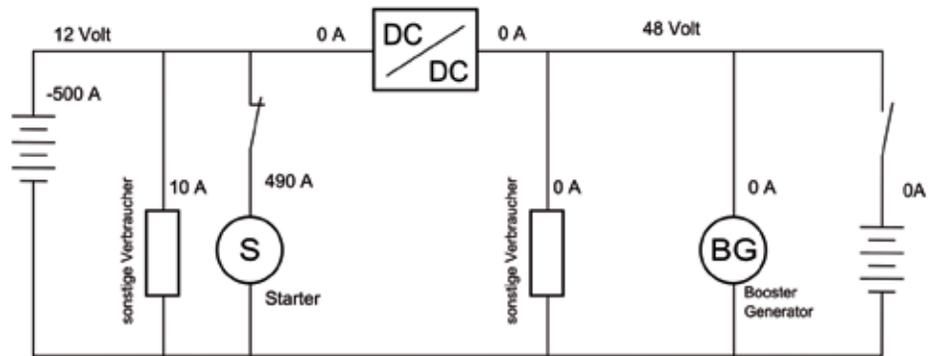


Bild 17: Start des Verbrennungsmotors bei zu kalter Lithium-Ionen-Batterie mit 12-Volt-Starter – Quelle: Leopold Kostal

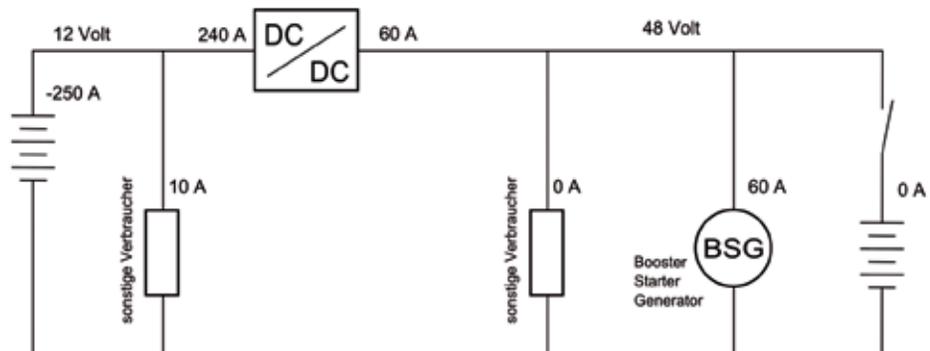


Bild 18: Start des Verbrennungsmotors bei zu kalter Lithium-Ionen-Batterie mit 48-Volt-Starter und Leistungsübertragung aus dem 12-Volt-Bordnetz per DC/DC-Wandler – Quelle: Leopold Kostal

3. Komponenten

3.1 Generatoren und Motoren

Es ist vorgesehen, dass in 48-Volt-Systemen jeder Auslegung der herkömmliche 12-Volt-Generator entfällt, da die Generatorfunktion von der 48-Volt-Maschine übernommen wird. Durch die höhere Spannung hat diese eine erheblich verbesserte Leistung und Effizienz.

Im Gegensatz zum 12-Volt-Generator erfüllen elektrische Maschinen zwei verschiedene Funktionen. Sie arbeiten sowohl als Generator als auch als Starter bzw. elektrischer Motor zur Antriebsunterstützung. Situationen, in denen gleichzeitig Drehmoment und hohe elektrische Leistung gefragt ist, stellen daher eine Herausforderung an das Energiemanagement im Bordnetzsystem dar. Entscheidende Parameter sind: Gesamtbelastung des Bordnetzes, Ladezustand (SOC und SOH) und Dimensionierung der Batterien. Das Energiemanagement übernimmt die Entscheidung, in welchen Situationen die einzelnen Funktionen wie Laden, Boosten und Rekuperieren freigegeben werden, und zwar in Abhängigkeit von den jeweiligen Fahrzuständen.

Während es sich bei 12-Volt-Generatoren systembedingt um Klauenpolmaschinen handelt, wird die Einführung von 48-Volt-Systemen zur Koexistenz verschiedener Technologien führen. Es bestehen zwei Maschinentechnologien – synchrone und asynchrone Maschinen (Bild 19).

Synchronmaschinen werden wiederum unterteilt in Maschinen mit Erregerwicklung, wobei es sich entweder um Schenkel- oder um Klauenpolrotoren handeln kann, in Permanentmagnetmaschinen und in Reluktanzmaschinen. Asynchron- oder Induktionsmaschinen werden aufgrund ihrer Rotortechnologie auch als Käfigläufermaschinen bezeichnet. Der Käfig kann hierbei entweder aus Aluminium oder aus Kupfer sein.

Drehmoment, Wirkungsgrad und Leistungsdichte der Maschinen variieren je nach Leistung und Maximalstrom des Gleichrichters. Insofern ist es schwierig, eine per se beste Maschine zu bezeichnen, zumal gerade in der Automobilbranche weitere Bedingungen wie Bauraum, Kosten, Robustheit und Standardisierung hinzukommen. Daher wird es bei 48-Volt-Motorgeneratoren zum Einsatz von verschiedenen Technologien kommen.

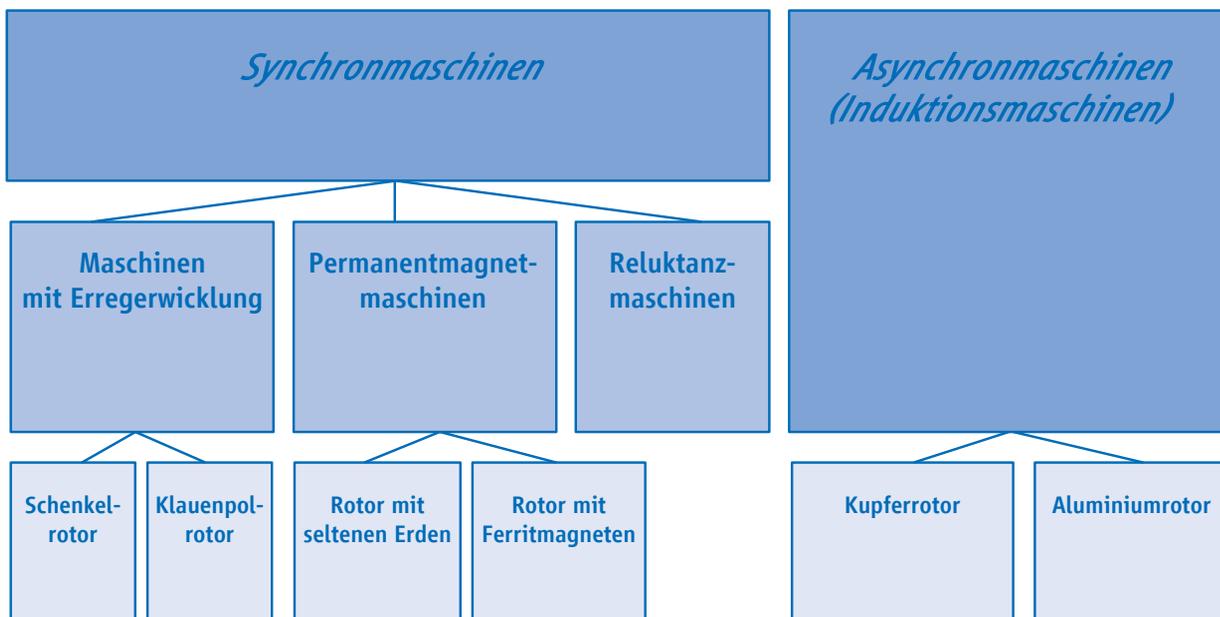


Bild 19 : Klassifizierung der Elektromaschinen – Quelle: Valeo



Bild 20: Riemengetriebene E-Maschine – Quelle: Valeo

Allerdings beeinflusst die Topologie des Antriebsstrangs die Maschinentechnologie maßgebend:

- Zukünftig werden 48-Volt-E-Maschinen mit Riemenantrieb (Bild 20 und Bild 9, Abschnitt 2.1.) den herkömmlichen 12-Volt-Generator ersetzen. Hier ist davon auszugehen, dass neben der aus der 12-Volt-Architektur bekannten Klauenpoltechnologie ebenfalls Induktionsmaschinen, eine Technologie, die bereits bei riemengetriebenen Maschinen im höheren Spannungsbereich in Serie ist, zum Einsatz kommt. Die Inverter-Elektronik wird hier meist in die Maschine integriert. Die Maschine bzw. Elektronik wird, je nach Anforderung, luft- oder wassergekühlt.

- Kurbelwellenintegrierte Motoren/Generatoren, auch ISG genannt, (Bild 10, 2.1.) sind in der Regel flache Maschinen mit hohen Auflagen an Bauraum und Integrierbarkeit, sowohl was den Durchmesser betrifft, der vom Verbrennungsmotor und vom Getriebe vorgegeben wird, als auch die Länge. So werden hierbei Maschinen mit der größtmöglichen Leistungsdichte bevorzugt, was vor allem zu Permanentmagnetmaschinen führt.

- Getriebeintegrierte Maschinen (Bild 21 und Bild 12, Abschnitt 2.1.), sei es in ein manuelles oder in ein Doppelkupplungsgetriebe, sind wie riemengetriebene Maschinen zylindrisch. Sie werden durch das Getriebeöl gekühlt werden, daher müssen diese Maschinen zwingenderweise bürstenlos sein. Anstelle der Klauenpolmaschinen werden hier Permanentmagnet- oder Induktionsmaschinen in Erwägung gezogen. Maßgeblicher Entscheidungsfaktor wird das im vorgegebenen Bauraum lieferbare Drehmoment sein,

das bei Permanentmagnetmaschinen höher ist als bei Induktionsmaschinen.

Die Variation an Topologien wie auch an entsprechenden Maschinentypen ist hoch, so dass es nicht die „Standardarchitektur“ bzw. den „Standard-Maschinentyp“ geben wird. Vielmehr führt die Einführung des 48-Volt-Systems zu einer Variabilisierung, die von so verschiedenen Faktoren wie gefordertes Drehmoment, existierende Plattformen, Kosten, Bauraum, Robustheit und CO₂-Zielsetzung bedingt wird.

3.2 Heizung und Zusatzheizer



Bild 21: Getriebeintegrierte E-Maschine – Quelle: Valeo

• Elektrischer Heizer

Es ist sinnvoll, den elektrischen Heizer als einen der Großverbraucher des 12-Volt-Bordnetzes in das 48-Volt-Bordnetz einzubinden, in dem er über ein Leistungsspektrum von drei bis fünf kW verfügt.

• Luftheizer

Im 12-Volt-Bordnetz wird in der Regel ein Luftheizer eingesetzt. Dieser Heizer-Typ erwärmt direkt die Luft, die in den Fahrgastraum befördert wird, und ist deshalb in die Klimaanlage integriert. Er bewirkt geringe Umsetzungsverluste, erwärmt schnell das Fahrzeuginnere und entleert die Windschutzscheibe.

Diese Heizertechnologie, die sich im 12-Volt-Bordnetz durchgesetzt hat, wird im 48-Volt-Bordnetz aufgrund der einfachen Übertragbarkeit als erstes ihren Einzug halten. Andere Heiztechnologien (Drahtheizer, Schichtheizer) sind ebenso denkbar. Welche Technologie sich hier durchsetzen wird, ist noch offen und entscheidet sich nach Kostengesichtspunkten, aber auch auf Basis des elektrischen Verhaltens der Heizung im Bordnetz. Gegebenenfalls wird ein Zuheizer auch zur Temperierung der Lithium-Ionen-Batterie genutzt.

- **Wasserheizer**

Ein Wasserheizer wird in den Kühlmittelkreislauf des Verbrennungsmotors hydraulisch eingebunden (Bild 22).

In der Klimaanlage wird der Wasserwärmtauscher des Kühlkreislaufs für die Beheizung des Fahrzeuginnenraums und für das Enteisen der Windschutzscheibe verwendet. Die Umsetzungsverluste sind zwar durch das zweimalige Übertragen der Wärme höher als beim Luftheizer. Jedoch kann zusätzlich durch die Erwärmung des Kühlmittels der Verbrennungsmotor schnell auf Betriebstemperatur gebracht und die 48-Volt-Batterie mit der Heizung temperiert werden.



Bild 22: Elektrischer Wasserheizer – Quelle: Webasto

3.3 Klimakompressoren

Generell ermöglicht der vom Fahrmotor unabhängige Betrieb eines Elektrokompessors weitere Effizienzsteigerungen des Klimasystems im Rahmen eines Gesamtenergiemanagements sowie im Sommer eine Erhöhung des thermischen Komforts durch Vorklimatisierung. Zurzeit wird der Markt von riemengetriebenen Kompressoren mit Antriebsleistungen zwischen drei und sechs kW dominiert.

Elektrokompessoren kommen heute in fast allen Elektromobilen und vielen Arten von Hybridfahrzeugen zum Einsatz (Bild 23). Inverter, Elektromotor und Mechanik bilden eine Einheit. Die erforderliche Leistung wird durch das vorhandene Hochvoltnetz mit beherrschbaren Stromstärken bereitgestellt. Heutige Elektrokompessoren sind für Spannungen zwischen ca. 120 und 450 Volt ausgelegt und mit entsprechenden Schutzvorrichtungen gegen Berührung und Trennung von Hoch- und Niederspannungsnetz versehen.

Eine Umstellung auf die 48-Volt-Versorgungsspannung führt zu weitaus höheren elektrischen Stromstärken, in der Spitze ca. 240 Ampere. Die Wicklung des Elektromotors und die Auslegung des Inverters müssen an die elektrischen Gegebenheiten angepasst werden. Hohe Ströme und Stromdichten führen zu höheren Leistungsverlusten in den elektrischen Bauteilen und als Folge zu größeren Abwärmeströmen. Dies ist bei der Gesamtauslegung der Kühlung der elektrischen Komponenten zu berücksichtigen.



Bild 23: Elektrokompessor – Quelle: Mahle Behr

Der Einsatz von 48-Volt-Kompressoren lässt sich technisch darstellen, erfordert jedoch größere Änderungen im elektrischen Teil. Platzbedarf, Gewicht und Kosten nehmen zu. Der vorgegebene Bauraum muss den Dimensionen der 48-Volt-Kompressoren angepasst werden.

3.4 Pumpen

Das 48-Volt-Bordnetz begünstigt den Einsatz leistungsstarker elektrisch betriebener Nebenaggregate. Dazu gehören unter anderem Pumpen für unterschiedliche Medien (Öl, Kühlmittel, Luft, Kraftstoffe). Sie lassen sich bedarfsgerecht zuschalten und regeln, wodurch eine Reduzierung von Energieverbrauch und Emissionen erreicht wird sowie darüber hinaus auch der Verschleiß gesenkt werden kann. Die maximalen Antriebsleistungen erhöhen sich von heute etwa ein kW auf bis zu sechs kW. Ein Markttrend zu hohen Leistungen bei gleichzeitig besserer Kontroll- und Diagnosemöglichkeit ist unverkennbar.

Elektrische Kühlmittelpumpen tragen zur Realisierung des riemenlosen Verbrennungsmotors bei (Bild 24).



Bild 24: Elektrische Kühlmittelpumpe – Quelle: Brose

Getriebe- und Motorölpumpen (Bild 25) können die heutigen mechanischen Hauptpumpen und die elektrischen Zusatzölpumpen komplett ersetzen und gleichzeitig Kosten und Wirkungsgrade für Automatikgetriebe optimieren sowie die Ölversorgung bei Motor-Stillstand sicherstellen.



Bild 25: Elektrische Getriebeölpumpe – Quelle: Brose

3.5 Frontscheibenheizung

Elektrische Frontscheibenheizungen sind seit vielen Jahren bekannt. Sehr häufig sind sie als dünne elektrische Heizdrähte im Verbund der Scheibe eingebettet. Eine alternative, immer häufiger eingesetzte Variante ist die schichtgeheizte Frontscheibe. Hier übernimmt eine elektrisch leitende, transparente Beschichtung, i. d. R. auf einer der Glasoberflächen aufgebracht, die Heizfunktion. Der Fahrer nimmt keine sichtbaren Heizstrukturen mehr wahr.

Durch die im Laufe der Zeit gewachsenen Scheibenflächen und die immer höheren Ansprüche an die Abtaugeschwindigkeit werden für solche Systeme heute kurzzeitig Leistungen im Bereich von über ein kW benötigt. Typische Leistungsdichten von 1.000 W/m^2 sind erforderlich, um eine als ausreichend schnell empfundene Enteisungswirkung zu erzielen (Bild 26).

Bei aktuellen Fahrzeugen erfüllt die Scheibenheizung vor allem eine Komfortfunktion zu Fahrtbeginn. Oft reichen wenige Minuten Betrieb für die Enteisung aus. Darüber hinaus wird die Heizung auch zur Vermeidung oder Beseitigung von Beschlag verwendet.

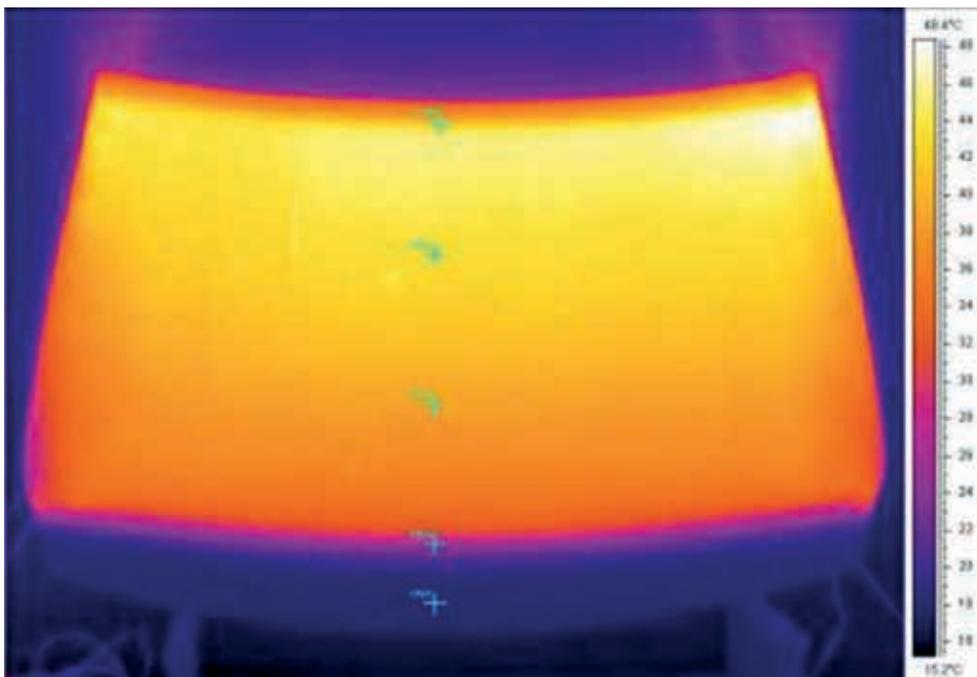


Bild 26: Wärmebild einer elektrisch geheizten Windschutzscheibe – Quelle: NSG

Insbesondere für zukünftige Elektrofahrzeuge ohne Verbrennungsmotor ist zu erwarten, dass die Bedeutung von Scheibenheizungen steigen wird, so dass eine häufigere Verwendung zu erwarten ist. Bei diesen Fahrzeugen ist ein sparsamer Umgang mit elektrischer Energie wesentlich, verringert doch der Verbrauch für Heizung und Klimatisierung die Reichweite von Elektrofahrzeugen unter Umständen ganz erheblich.

Geringerer Energieeinsatz für Innenraumbeheizung und Klimatisierung werden jedoch die Gefahr von Beschlagbildung auf allen Scheiben deutlich steigen lassen. Aus diesem Grunde kann davon ausgegangen werden, dass die Scheibenheizung neben der Enteisung zu Fahrtbeginn dann auch noch die Verhinderung von Beschlag im geregelten Dauerbetrieb während der Fahrt übernehmen wird.

Die direkte elektrische Heizung der Scheibe kann effizienter und kontrollierter erfolgen als durch indirekte Heizung mit einem Luftstrom. Dieser Aspekt kann auch eine elektrische Beheizbarkeit von anderen Scheibenpositionen wünschenswert erscheinen lassen. Eine vollständige Beheizbarkeit aller Scheiben würde bei zwei bis drei m^2 Gesamtfläche dann eine Anschlussleistung bis zu 2,5 kW erwarten lassen. 48-Volt-Bordnetze können hier helfen, die hohen, unter Umständen längerfristig abgeforderten Leistungen für die Scheibenheizungen als integrierter Bestandteil der Fahrzeugklimatisierung bereitzustellen.

3.6 Chassis-Funktionen

Elektrisch betriebene Fahrwerksysteme haben einen für Pkw-Bordnetze hohen Leistungsbedarf bei Peak-Leistungen im kW-Bereich. Beispiele sind elektrische Servolenkung (EPS), Hinterachslenkung, Wankstabilisierung sowie die aktive Federung/Dämpfung. Mit diesem Leistungsbedarf sind Fahrwerksysteme automatisch Kandidaten für eine 48-Volt-Versorgung, einige erfordern dies sogar.

Im Folgenden werden die elektrische Servolenkung und die Wankstabilisierung näher betrachtet.

- **Elektrische Servolenkung (EPS)**

Bis zum Ende der 1990er Jahre herrschte die Meinung vor, dass die EPS nur für Vorderachslasten bis zur Mittelklasse eingesetzt werden könne. Bei höheren Vorderachslasten reichte die Leistung des 12-Volt-Motors nicht aus, eine ausreichende Servo-Unterstützung sicherzustellen. In Fahrzeugen der gehobenen Mittelklasse und Luxusklasse wurde die hydraulische Servolenkung eingesetzt. Weiterentwicklungen der EPS ermöglichen immer höhere Achslasten. Heute kann die EPS auf 12-Volt-Basis in fast allen Pkws eingesetzt werden und wird die hydraulische Servolenkung ganz verdrängen.

Insofern erfordert die EPS keine 48-Volt-Versorgung. Es ist zurzeit ungeklärt, ob ein 48-Volt-Motor in einer EPS Vorteile bietet, die eine Umstellung rechtfertigen. Damit ist die EPS keine treibende Kraft für die Einführung eines 48-Volt-Bordnetzes. Wenn ein solches Bordnetz realisiert ist, wird die Variante 48-Volt-EPS aber sicher untersucht werden. Insbesondere bei Fahrzeugen mit EPS und Hinterachslenkung kann die 48-Volt-Lösung Vorteile bieten. Die Lenksysteme an der Vorder- und Hinterachse werden gleichzeitig angesteuert und benötigen dadurch eine höhere Peakleistung vom Bordnetz. Diese könnte beim Einsatz eines 48-Volt-Bordnetzes die Belastung des 12-Volt-Bordnetzes erheblich reduzieren.

- **Wankstabilisierung**

Ein bedeutender Automobilhersteller hat 2014 eine elektrische Wankstabilisierung auf Basis von 48 Volt vorgestellt (Bild 27).

Es handelt sich um ein konventionelles 12-Volt-Bordnetz. Ein DC/DC-Wandler erzeugt die 48 Volt, welche ausschließlich die elektrische Wankstabilisierung versorgen. Insofern handelt es sich um eine 48-Volt-Insellösung und nicht um ein 48-Volt-Bordnetz. Diese Insellösung kann als erster Schritt auf dem Weg zum 48-Volt-Bordnetz verstanden werden.

- **Vorteile von elektromechanischen Fahrwerksystemen**

Elektromechanische Fahrwerksysteme benötigen lediglich während der Stellvorgänge Energie vom Bordnetz und bieten dadurch große Effizienzvorteile gegenüber hydraulischen Systemen. Ferner können Stellmomente mit Elektromotoren viel schneller erzeugt werden als mit Hydraulikflüssigkeit. Aufgrund dieser Effizienz- und Dynamikvorteile favorisieren die Automobilhersteller die Elektrifizierung von Fahrwerkkomponenten.

- **Auswirkungen auf das Bordnetz**

Die Störgrößenregelung (Kompensierung der Fahrbahnunebenheit, etc.) sowie sportliche Fahrmanöver stellen hohe Dynamikanfor-

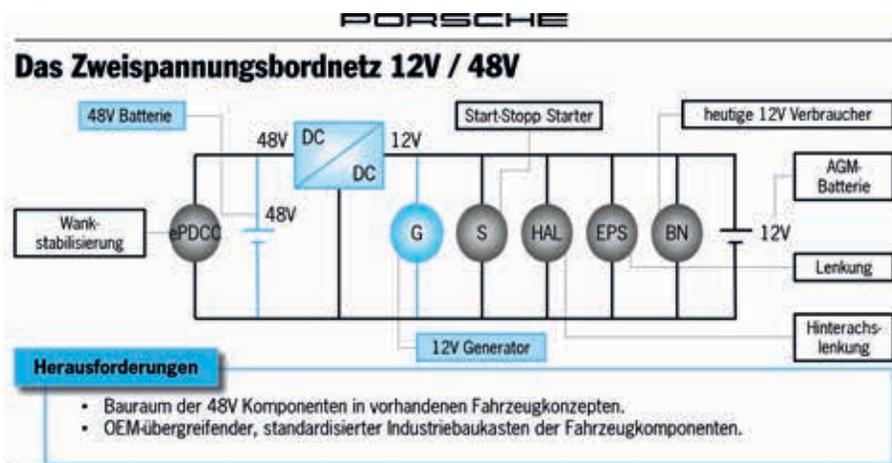


Bild 27: Die 48-Volt-Versorgung für die elektrische Wankstabilisierung – Quelle: Porsche

derungen an die Fahrwerksysteme, die sich in Form von Leistungspeaks im Bordnetz widerspiegeln. Das 12-Volt-Bordnetz kann diese dynamischen Leistungsanforderungen nicht erfüllen und stößt schnell an seine Leistungsgrenzen. Ferner würden bei Nutzung eines 12-Volt-Netzes die erforderlichen Bordnetzströme hohe Verlustleistungen in der Energieverteilung erzeugen. Je mehr Fahrwerksysteme im Fahrzeug elektrifiziert werden, desto häufiger werden Leistungsspitzen im Bordnetz auftreten. Dies erfordert die Einführung einer höheren Spannungsebene und begründet die Notwendigkeit des 48-Volt-Bordnetzes.

• **Bauraum**

Grundsätzlich bietet das 48-Volt-Bordnetz keine Bauraumvorteile für Fahrwerk-Aktuatoren. 12-Volt-Aktuatoren besitzen weniger Windungen mit einem größeren Leiterquerschnitt, während 48-Volt-Aktuatoren höhere Windungszahlen mit kleineren Querschnitten aufweisen. Bleiben Wickelfenster und Leistungsanforderungen gleich, können keine hohen Bauraumvorteile mit 48-Volt-Aktuatoren gegenüber 12-Volt-Systemen erzielt werden.

Die Vorteile der 48-Volt-Technologie kommen insbesondere bei den dynamischen Merkmalen, beim Aufbau und bei der Verbindungstechnik von elektronischen Komponenten und bei den Leistungsanforderungen von elektromechanischen Fahrwerksystemen zur Geltung. Ferner wird die Verlustleistung in den Zuleitungen mit der Einführung der höheren Spannungsklasse erheblich reduziert. Die Peakleistungen von Fahrwerkkomponenten erfordern zwingend eine höhere Spannungsebene. Die 48-Volt-Plattform wird durchaus die weitgehende Elektrifizierung von Fahrwerkkomponenten ermöglichen und die dynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs deutlich verbessern.

3.7 Lüftermotoren

Generell haben Verbraucher mit großem Leistungsdurchsatz eine bevorzugte Realisierungschance in einem 48-Volt-Bordnetz. Bedingt durch Verluste in Zuleitung und magnetischem Kreis sowie dem schon aus thermischen Grün-

den erforderlichen hochwertigen Aufbau des Leistungsteils profitieren gerade Hochleistungslüfter, wie sie bei der Kühlung des Antriebsmotors Verwendung finden, insbesondere hinsichtlich ihres verbesserten Wirkungsgrades.

Beispielhaft seien hier zwei Antriebe für den Kühlerlüfter vorgestellt (Bild 28 und 29), die in unterschiedlichen Leistungsklassen skalierbar sind und ein breites Spektrum an Dimensionierungsvarianten erlauben.

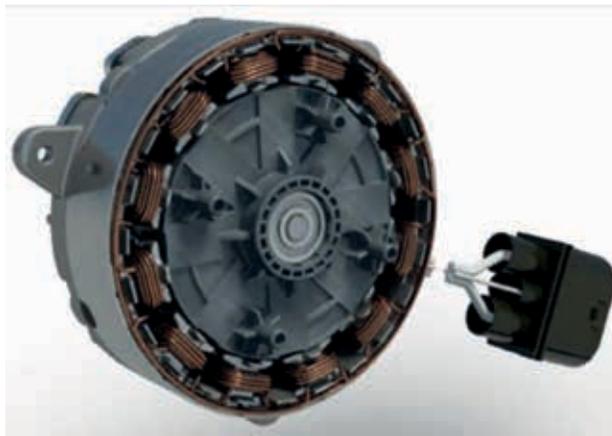


Bild 28: Kühlerlüfterantrieb für untere Leistungsklassen (bis 600 W elektrische Leistung) – Quelle: Brose



Bild 29: Kühlerlüfterantrieb für obere Leistungsklassen (bis 1.000 W elektrische Leistung) – Quelle: Brose

Gerade in den höchsten Leistungsklassen werden die Vorteile der hohen Versorgungsspannung sichtbar. Die Vorteile der Reduzierung der Leitungsquerschnitte, einer geringeren Beanspruchung von Steckverbindern sowie der geringeren Strombelastung der erforderlichen Halbleiter und passiven Bordnetzfilter-

elemente überwiegen dabei den Nachteil der erforderlichen erhöhten Spannungsfestigkeit. Applikationsabhängig kann die Spannungsdifferenz zwischen Versorgungs- und interner Nutzspannung der Logikbauelemente einen etwas höheren schaltungstechnischen Aufwand bedeuten. 12-Volt- und 48-Volt-Netz sind in geeigneter Weise voneinander getrennt. Besondere Aufmerksamkeit wurde den Kriech- und Luftstrecken gewidmet. Die Masseanbindung der Antriebe ist für den Betrieb an einem zentralen Massestern ausgelegt und stellt mittels kapazitiver Kopplung einen störungsarmen Betrieb sicher.

3.8 Verbindungssysteme

Die Frage nach den elektrischen Verbindungssystemen für ein 48-Volt-Bordnetz sollte sich über die technischen Herausforderungen, die im Zusammenhang mit den der erhöhten Bordnetzspannung stehen, beantworten lassen. Steckverbindungssysteme, die sich bereits seit Jahren in Automobilen (14 Volt) oder in Lastkraftwagen (28 Volt) im Einsatz bewährt haben, bieten sich als eine kostenneutrale Lösung auf das 48-Volt-Bordnetz an.

Eine Übernahme der meist geschirmten und mit Berührungsschutz ausgestatteten Hochvoltsteckverbinder, die für den Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen bis 850 Volt entwickelt wurden, ist aus technischer Sicht denkbar, aber aus Kosten- und Platzgründen (Bild 30) nicht zu empfehlen.



Bild 30: Größenunterschied 48 Volt (grün) zu Hochvolt (orange) – beide für 2,5 mm² ausgelegt – Quelle: TE Connectivity

Generell ist bei der Verwendung der klassischen Automobilsteckverbinder im 48-Volt-Bordnetz, auf die Einhaltung der Luft- und Kriechstrecken nach der DIN-EN 60664-1 (Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen) zu achten bzw. es ist der Nachweis der Konformität zu führen.

Bei der Berechnung der Luft- und Kriechstrecken sind die Verschmutzungsstufe 2 und eine Höhe von 5.500 Metern über Normalnull gefordert. In der Regel erfüllen die meisten wasserdichten Steckverbinder diese Anforderungen, da sie die benötigten Abstände zwischen den Kontaktpaaren einhalten. Für die nicht wasserdichten Steckverbinder, insbesondere bei der Miniaturisierung, werden die Anforderungen nur teilweise oder gar nicht erfüllt. Die Konstruktion der Gehäuse ist hier entscheidend. Um bei diesen Gehäusen die Anforderungen an die Luft- und Kriechstrecken zu erfüllen, könnte der Anwender zum Beispiel jede zweite Kontaktkammer ohne eingesetzten Kontakt verwenden.

Dennoch darf man die technischen Herausforderungen, die mit der Einführung des 48-Volt-Bordnetzes einhergehen, nicht ganz vernachlässigen, z. B. das Ziehen eines Steckverbinders unter Last und die ablaufende Elektrolyse beim Eindringen von elektrolythaltiger Feuchtigkeit in Steckverbindungen, die unter Spannung stehen. Empfehlenswert ist daher der Einsatz von wasserdichten Steckverbindern. Dabei wäre es vorteilhaft die Kontaktkammern voneinander zu trennen (Bild 31) und einzeln abzudichten. Für das Ziehen unter Last sollte ein systemischer Architekturansatz gewählt werden, der eine Kontaktunterbrechung detektiert und den entsprechenden Pfad spannungsfrei schaltet.



Bild 31: 2-poliger Steckverbinder für 48-Volt Applikationen mit einzelgedichteten Kammern – Quelle: TE Connectivity

3.9 Leitungssätze

Da die heutigen 12-Volt-Leitungssätze und deren Komponenten für Spannungen bis 60 Volt spezifiziert sind, kann man rein theoretisch alle Komponenten für den 48-Volt-Betrieb uneingeschränkt verwenden, was sich positiv auf die Kosten auswirkt. Trotzdem müssen systemische Effekte betrachtet werden, die daraus resultieren, dass zwei unterschiedliche Spannungsebenen zusammen in einer Umgebung eingesetzt werden. Hauptproblem stellt die gegenseitige Absicherung dar. Werden Kurzschlüsse in beiden Systemen sicher detektiert, kann ein Kurzschluss unter Beteiligung beider Spannungskreise zu signifikanten Störungen führen. Hier gilt es entsprechende intelligente Überwachung einzuführen oder/und beide Spannungsebenen sicher räumlich voneinander zu trennen.

Das 48-Volt-Bordnetz folgt der Anforderung, im Vergleich zum Hochvolt-Bordnetz mehr elektrische Leistung zu reduzierten Kosten zur Verfügung zu stellen. Praktisch alle Fahrzeuge im mittleren bis oberen Fahrzeugsegment haben Start/Stopp-Systeme sowie einen hohen elektrischen Leistungsbedarf. In diesen Segmenten würde sich ein 48-Volt-Bordnetz (zusätzlich zum 12-Volt-Bordnetz) voraussichtlich für alle Nicht-Hochvolt-Fahrzeuge durchsetzen können.

Auf der anderen Seite kann das 48-Volt-System nicht die Anforderungen für rein elektrisches Fahren oder Vollhybride erfüllen. Das 48-Volt-Bordnetz stellt daher keine Alternative, sondern eine Ergänzung zur Hochvolt-Technologie dar, die umso tragfähiger wird, umso kostengünstiger die 48-Volt-Technologie ist.

Aus Sicht der Bordnetzarchitektur folgt eine Kostenersparnis aufgrund folgender reduzierter Anforderungen:

- kein Berührschutz in den Steckern erforderlich
- keine besondere Spannungsfestigkeit (Luft- und Kriechstrecken) notwendig
- keine geschirmten Leitungen erforderlich
- keine HVIL-Pilotlinie (Vermeidung des Ziehens unter Last) notwendig
- keine separate Masse (B-) erforderlich

Beim 48-Volt-Bordnetz ist zu erwarten, dass folgende Kostentreiber zu vermeiden sind:

- hochwertige Kontaktsysteme mit niedrigen Übergangswiderständen
- Leitungssätze mit separaten Verlegewegen und aufwändigem Leitungsschutz
- gedichtete Systeme (Korrosionsschutz)
- Anpassung der Verbindungssysteme

Die oben genannten reduzierten Anforderungen (z. B. HVIL) sind nicht sicher nutzbar. So ist z. B. auch bei dem 48-Volt-Bordnetz das Ziehen unter Last zu verhindern. Aus Gründen der Sicherheit und der EMV wird sich das 48-Volt-Bordnetz daher möglicherweise als ähnlich aufwändig herausstellen wie das Hochvolt-Bordnetz, in den ersten Projekten aufgrund der Initialkosten sogar möglicherweise teurer. Zudem werden bei Verzicht auf Sicherheitsmaßnahmen aus dem Hochvolt-Bordnetz zusätzliche Schutzeinrichtungen wie beispielsweise die oft diskutierte Lichtbogenerkennung erforderlich.

Aufgrund der zu vermeidenden Kurzschlusszenarien werden auch die Themen Sicherungen und Leitungsverlegung ähnlich aufwändige Lösungen erfordern wie im Hochvolt-Bordnetz. Ein System mit z. B. 15 kW Leistungspotential könnte als Hochvolt-System mit deutlich kleineren Steckverbindern und Leitungen aufgebaut werden als ein entsprechendes 48-Volt-System. Auf diese Leistungsklasse ist das heutige Hochvolt-Bordnetz nicht optimiert. Beim Vergleich der Systeme auf Basis gleicher Funktionalitäten zeigen sich daher einige Vorteile auf der Seite des Hochvolt-Bordnetzes.

3.10 Inverter

Zum Betrieb eines Starter-Generators wird ein bidirektionaler Inverter benötigt. Dieser setzt den Gleichstrom der Batterie in einen 3-Phasen-Wechselstrom um. Damit werden die einzelnen Wicklungen der elektrischen Maschine mit elektrischer Energie versorgt. Bei der Rekuperation erfolgt ein umgekehrter Energiefluss. In diesem Fall wandelt der Inverter den erzeugten Wechselstrom in Gleichstrom, mit dem die Batterie geladen wird. Funktional gleicht der Aufbau des Inverters im 48-Volt-Netz dem des Hochvolt-Inverters, wie er in Voll-Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen verwendet wird (Bild 32).

Ein Hauptunterschied besteht bei den verwendeten Leistungshalbleitern. Im Gegensatz zur Hochvolt-Variante, bei der vornehmlich IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) zum Einsatz kommen, sind aufgrund der geringeren Spannungen beim Inverter für Starter-Generatoren MOSFETs als Schaltelemente prädestiniert. Zur Ansteuerung einer 3i-Phasen-Maschine werden die MOSFETs zu drei Halbbrücken konfiguriert.

3.11 DC/DC-Wandler

Für den Energietransfer zwischen beiden Teilnetzen des Zweispannungsbordnetzes wird ein Spannungswandler (DC/DC-Wandler) verwendet, der vorzugsweise die Energie vom 48-Volt-Teilsystem in die 12-Volt-Ebene überträgt, d. h. vorrangig als Abwärtswandler betrieben wird. In dieser Energietransferrichtung ersetzt der DC/DC-Wandler den Generator für das klassische 12-Volt-Bordnetz. Szenarien, in denen der Wandler im Aufwärtsbetrieb arbeitet, weisen lediglich Teillastanforderungen für die Sicherstellung des 48-Volt-Netzbetriebes auf. Alternativ handelt es sich um Inselbordnetzlösungen ohne 48-Volt-Generator.

Betrachtet man die verschiedenen Ausbaustufen einer 48-Volt-Realisierung mit und ohne 48-Volt-Verbraucher, sind Leistungsklassen für den Spannungswandler von ein kW bis drei kW zu implementieren. Um eine kosteneffiziente Produktion zu gewährleisten, ist damit für die Unterstützung der verschiedenen Leistungsklassen eine modulare und skalierbare Konverter-Architektur erforderlich. Der skalierbare Wandler ist in Halbbrückenschaltung (Bild 33 und 34) mit mehreren Phasen zu realisieren und muss einen Verpolschutz für 14 Volt, Durchgriffschutz und Kurzschlusschutz sowie Sicherheit gegenüber Einfach Fehlern der Leistungsbauteile aufweisen. Die Kühlung kann durch aktive oder passive Luftkühlung oder durch eine Wasserkühlung realisiert werden.

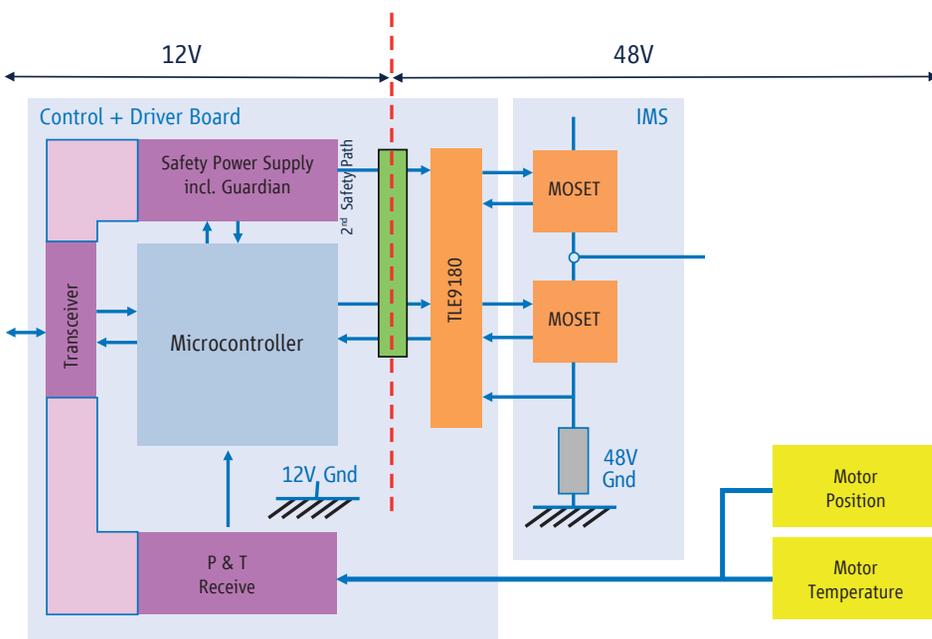


Bild 32: Blockdiagramm der Elektronik eines Inverters – Quelle: Infineon Technologies

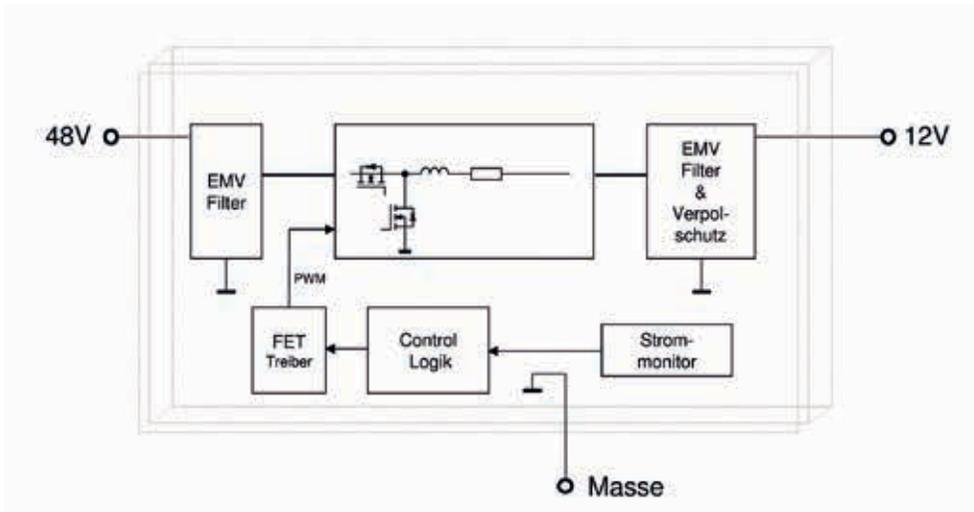


Bild 33: Blockdiagramm des skalierbaren 48 Volt/12 Volt DC/DC-Wandlers in Halbbrückentopologie – Quelle: ???



Bild 34: 48 Volt/12 Volt DC/DC-Wandler – Quelle: Hella

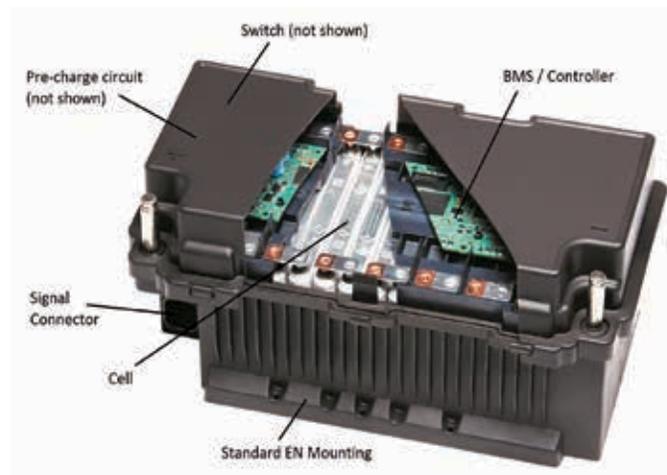


Bild 35: 48-Volt-Lithium-Ionen-Batterie – Quelle: Johnson Controls

3.12 Energie- und Batteriemangement

Ein Zweispannungsboardnetz, wie hier betrachtet, enthält eine 12-Volt-Blei-Säure-Starterbatterie sowie eine 48-Volt-Lithium-Ionen-Batterie. Die 48-Volt-Lithium-Ionen-Batterie (Bild 35) ist in der Lage, Hochleistungsverbraucher wie die Klimaanlage, die Wasserpumpe, aktive Fahrwerksregelung und elektrische Antriebsunterstützung zu versorgen und die beim Abbremsen des Fahrzeugs erzeugte elektrische Rekuperationsenergie aufzunehmen. Die 12-Volt-Blei-Säure-Batterie wird die übrigen Bordnetzverbraucher wie Beleuchtung, Unterhaltungselektronik und Ruhestromverbraucher wie Uhren und Sicherheitssysteme versorgen und dient als Rückfalllösung bei Ausfall der Versorgung aus dem 48-Volt-Bordnetz.

Ein entscheidender Aspekt, um die Kosten einer 48-Volt-Batterie im Rahmen zu halten, ist eine weitreichende Standardisierung verschiedener Komponenten (Elektronik, Stecker, Software), ebenso wie die Definition standardisierter Bauräume und Fahrzeugschnittstellen.

Die Hauptanforderungen an eine 48-Volt-Batterie betreffen typischerweise Pulsleistungen in Lade- und Entladerichtung, sowie einen bzgl. verfügbarer Energie ausreichend großen Ladezustands- und Temperaturbereich, in dem diese Leistungen verfügbar sind.

Die Batterie besteht prinzipiell aus den folgenden Komponentengruppen:

- Zellpaket (Energiespeicher)
- Batteriemanagement-System (Kontrolle und Steuerung)
- thermisches Management
- Gehäuse, Peripherie und Schnittstellen (mechanischer Schutz, Befestigung, Fahrzeuganbindung)

Das Zellpaket besteht aus einer durch die gewählte Zellchemie bestimmte Anzahl von in Reihe geschalteter Zellen. Abhängig von geforderter Kapazität der Batterie und Einzelkapazität der gewählten Zellen können mehrere Zellen oder Batteriestränge parallel geschaltet werden. Bevorzugt werden prismatische Zellen oder Pouch-Zellen verwendet, es stehen aber auch Rundzellen zur Verfügung. Spannungslage und -grenzen unter verschiedenen Betriebsbedingungen werden in Standards wie VDA 320 definiert.

Spannungslage und Kapazität der Zellen werden durch den Anoden- und Kathodentyp bestimmt. Heute verwendete typische Anodenmaterialien sind Graphit, Hart-Kohlenstoff oder Lithiumtitanat (LTO), typische Kathodenmaterialien sind Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide (NMC) oder Lithium-Eisenphosphat (LFP). Die Wahl der Anode/Kathode-Kombination bestimmt neben der Spannungslage auch die elektrischen Leistungseigenschaften der Batterie.

Die Batteriemanagementeinheit (BMU/BMS) ermöglicht die folgenden Funktionen:

- Management des optimalen Betriebsbereiches, um die erforderlichen elektrischen Leistungen sicherzustellen und die langfristige Haltbarkeit der Batterie zu gewährleisten,
- Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Betriebs,
- Kommunikation zum Kontroll- und Steuerungssystem auf der Fahrzeugseite.

Um den Operationsbereich der Batterie zu regeln, ist es notwendig, den Strom, die Einzelzellspannungen sowie die Temperatur an ausgewählten Stellen zu messen. Das Batteriesystem kommuniziert mit dem Bordnetz typischerweise über eine Kommunikationsschnittstelle. Strom und Spannung der Batterie werden anhand des übermittelten Batteriezustandes geregelt (Ladezustand, maximale Leistungsaufnahme und -abgabe, Strombegrenzung). Typischer Temperaturbereich für den Betrieb einer Lithium-Ionen-Batterie ist -30 °C bis $+60\text{ °C}$, wobei die volle Leistungsfähigkeit nur im Bereich von ca. 0 °C bis 35 °C gegeben ist. Die Batterie kann mittels Temperierung durch Kältemittel, Flüssigkeit oder Luft in einem definierten Temperaturbereich gehalten werden. In manchen Fällen kann auch passive Temperierung ausreichen.

Die Maße der 48-Volt-Batterien können sich z. B. an denen für heutige Blei-Starterbatterien definierten Abmessungen orientieren, wobei je nach Einbauort und -umgebung einzelne Dimensionen oder das Befestigungskonzept abweichen können. In den letzten Jahren haben sich speziell für den Automobilbereich verschiedene Sicherheitsstandards für Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien etabliert, die auch bei der Entwicklung von 48-Volt-Lithium-Ionen-Batterien zu berücksichtigen sind.

3.13 Aktive elektronische Bauelemente

Elektronische Steuergeräte des 48-Volt-Bordnetzes besitzen grundsätzlich die gleiche Struktur wie sie auch in 12-Volt- bzw. Hochvolt-Bordnetzen üblich ist. Beim Einsatz im 48-Volt-Bordnetz muss die Auswahl der Halbleiterbauelemente der veränderten Spannungslage als auch den geänderten Lasten Rechnung tragen. Als Haupteinsatzgebiet der Halbleiterbauelemente im 48-Volt-Bordnetz ist die Regelung elektrischer Motoren und anderer elektrischer Lasten zu sehen. Daneben wird die Verbindung zwischen der 48-Volt- und der 12-Volt-Bordnetzebene mithilfe eines DC/DC-Wandlers hergestellt. Die notwendigen Halbleiterbauelemente können nach Sensoren, Mikrocontrollern und Leistungs-ICs, Versorgungs-, Kommunikations- und sogenannten Treiber-ICs kategorisiert werden.

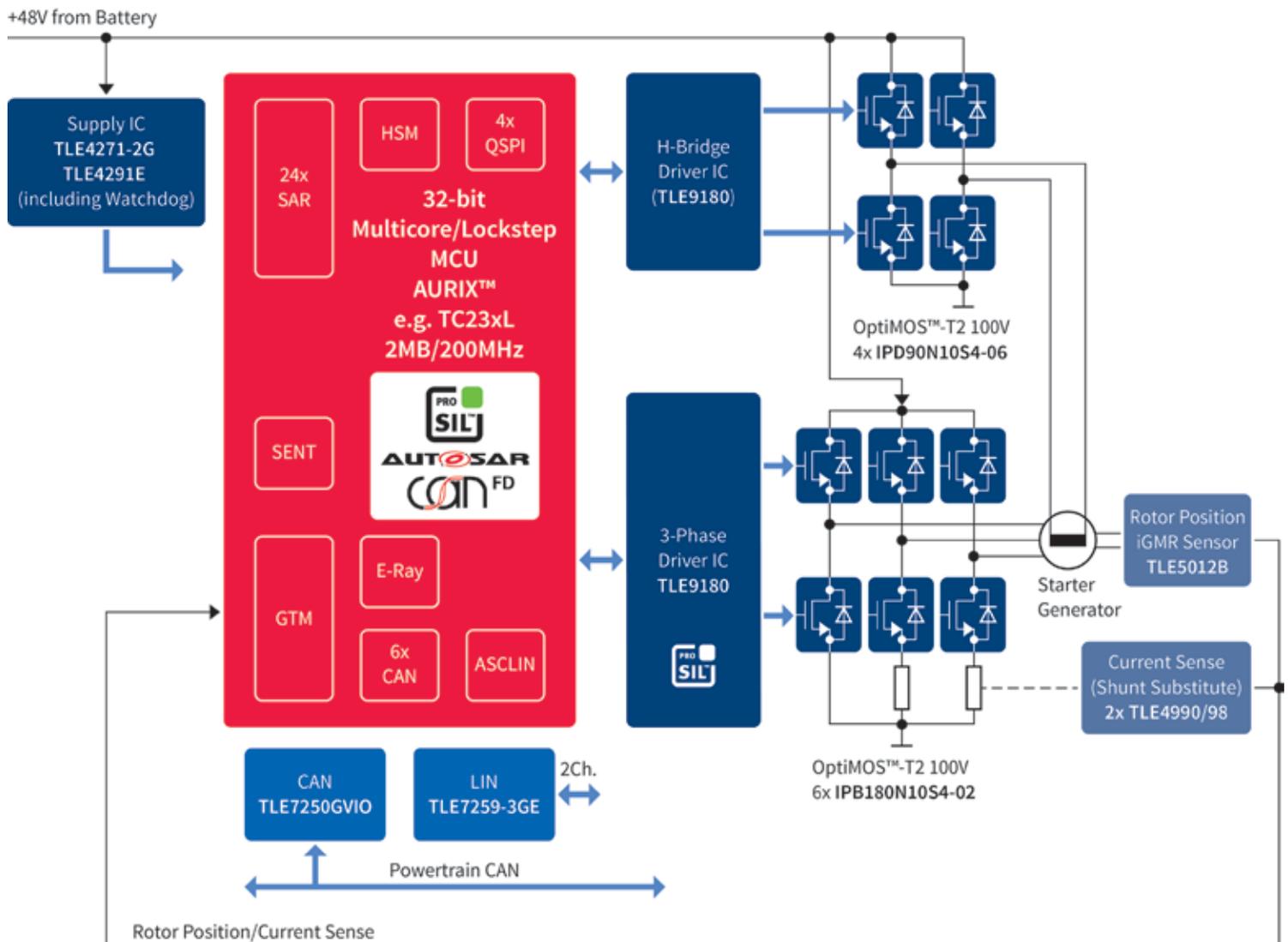


Bild 36: Halbleiterbauelemente für die Start/Stopp- und Generator-Steuerung im 48-Volt-Bordnetz – Quelle: Infineon Technologies

Das Blockschaltbild (Bild 36) zeigt die grundsätzliche Struktur der Halbleiter, wie sie zur Regelung des Starter/Generators im 48-Volt-Bordnetz eingesetzt werden. Hierbei ist neben den für die Motorregelung notwendigen Endstufen noch eine zusätzliche, zur Regelung des Erregerstroms im Generator-Betrieb, dargestellt. Zur Spannungsversorgung des Mikrocontrollers wird die Systemspannung (48 Volt) auf ein für Mikrocontroller und andere ICs übliches Maß reduziert. Dies ist die wesentliche Aufgabe des Versorgungs-ICs. Daneben übernimmt er weitere zusätzliche Aufgaben im Bereich der Funktionalen Sicherheit. Der Mikrocontroller als „Gehirn“ der Steuerung ermöglicht sowohl die feldorientierte Regelung des elektrischen Motors als auch die Regelung der Erregerwicklung im generatorischen Betrieb. Hierfür sind komplexe Timer-Einheiten im Mikrocontroller

implementiert. Darüber hinaus kommuniziert er mit anderen Steuergeräten des Fahrzeugs über diverse Kommunikationsbusse. Die Signale der Sensoren werden zur Ermittlung des aktuellen Status des Motors und des Inverters verarbeitet. Der Mikrocontroller unterstützt durch entsprechende Schaltungsteile die Implementierung von Sicherheits-Aspekten gegen Manipulationen (Hardware-Security-Module, HSM).

Im 48-Volt-Bordnetz werden als Leistungsendstufen-ICs vielfach MOSFET-Bausteine eingesetzt. Im Spannungsbereich des 48-Volt-Netzes besitzen sie gegenüber den IGBT die deutlich bessere Charakteristik im Hinblick auf Durchlass- und Schaltverluste. Neben der eigentlichen Auslegung der Halbleiterschalter für Ströme größer 100 Ampere ist es wichtig, eine ausreichend gute Abführung der Verlustleis-

tung (Entwärmung) mittels geeigneter Gehäusebauformen der Leistungshalbleiter zu erreichen. Hierzu sind, je nach Steuergeräteaufbau, unterschiedliche Bauformen geeignet, die von Standard-TO-Gehäusen für den Einzeltransistor über die Integration der Endstufen (eine oder alle Phasen) in einem Leistungsmodul bis hin zur direkten Integration der Leistungsbaulemente in den Motor reicht.

„ Als weiteres wichtiges Element sind die Treiber-ICs zu nennen. Ihre Aufgabe besteht darin, die vom Mikrocontroller erzeugten (PWM)-Signale zur Ansteuerung des Motors auf das für die Leistungsendstufen notwendige Niveau anzupassen. Um dies zu gewährleisten ist es notwendig, gegebenenfalls auch mehrere Treiber zu verwenden.

Mit den Sensoren werden die Lage des Elektromotorrotors und die aktuell im Inverter fließenden Ströme erfasst und an den Mikrocontroller weiter geleitet. Die Rotorlage kann entweder mithilfe sogenannter Encoder oder über Magnetfeldsensoren (Bild 37) festgestellt werden. Im zweiten Fall wird ein Magnet auf die Rotornabe aufgebracht. Mithilfe eines geeigneten Magnetfeldsensors, der ortsfest in unmittelbarer Nähe hierzu angebracht ist, kann nun die Winkellage als auch die Drehgeschwindigkeit des Rotors ermittelt werden. Hierbei können intelligente Sensor-ICs die gemessenen Daten bereits IC-intern verarbeiten und diese als Digitalwerte über einen Sensor-Bus dem Mikrocontroller zur Verfügung stellen.

Zur genauen Regelung des Motors ist es darüber hinaus notwendig, auch die Ströme in den einzelnen Motorsträngen an den Mikrocontroller zu übermitteln. Hierzu sind im Inverter entweder Shunt-Widerstände notwendig oder die Ströme werden mithilfe von Magnetfeldsensoren ermittelt. Elektrisch wird das 48-Volt-Bordnetz mit dem 12-Volt-Bordnetz mithilfe eines DC/DC Wandlers gekoppelt.

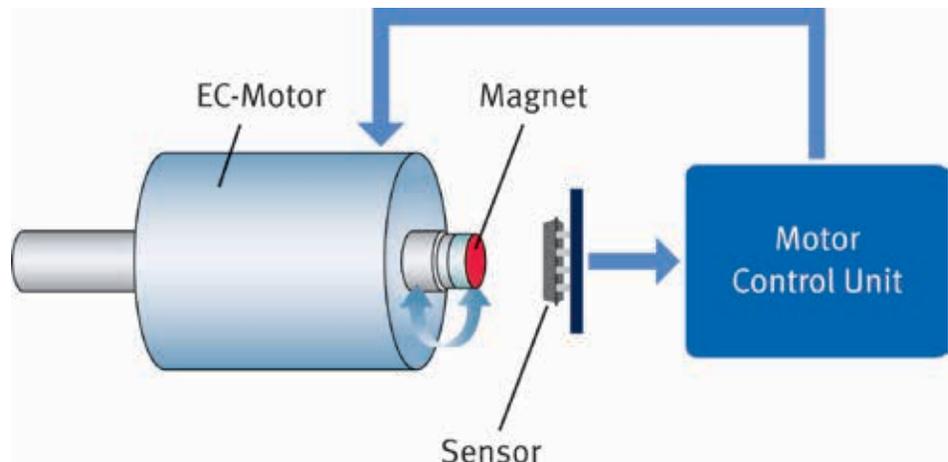


Bild 37: Detektion des Rotors mithilfe eines hochintegrierten Magnetfeldsensors (schematische Darstellung) – Quelle: Infineon Technologies

Je nach Anforderung ergeben sich für den Aufbau des DC/DC-Wandlers unterschiedliche Lösungsansätze. Als wichtigste Anforderungen sind zu nennen:

- Wandlerleistung,
- Verlustleistung (Wirkungsgrad),
- Bauraum/-volumen (W/l),
- uni- oder bidirektionale Leistungsübertragung,
- galvanisch gekoppelt oder getrennt,
- Einstufung funktionale Sicherheit.

Für den Aufbau ergeben sich daraus unterschiedliche Topologien (einphasig, mehrphasig, multiphasig). Auch ist die Wahl der Wandlerfrequenz von Bedeutung. Funktional kommen auch hier Halbleiterbauelemente, bestehend aus Mikrocontroller, Treiber-ICs, Leistungsendstufen, Versorgungs- und Kommunikations-ICs, zum Einsatz. Die Auswahl der genauen Typen hängt von der Festlegung der oben genannten Parameter ab. Insbesondere die Leistungs-ICs und die Treiber-ICs sind entsprechend auszuwählen.

3.14 Passive Bauelemente

Ein entscheidend neues Einsatzgebiet ist die Kopplung der Spannungsebenen durch bidirektionale DC/DC-Wandler. Sie gehören zu den wichtigsten Baugruppen der 48-Volt-Technik. Neben Leistungshalbleitern übernehmen passive Bauelemente wie Kondensatoren und Induktivitäten in den Wandlern Schlüsselfunktionen: Sie speichern elektrische Energie, glätten Spannungen, entstören Schaltungen und sorgen damit für die EMV. Darüber hinaus ist im 48-Volt-Bordnetz bei der Rekuperation, also der Rückgewinnung von Bremsenergie, eine Regelung der Starter-Generator-Kombination des Fahrzeugs erforderlich.

Passive Bauelemente für die neue 48-Volt-Technik müssen dieselben hohen Qualitätsanforderungen erfüllen wie Bauelemente für 12-Volt- bzw. 24-Volt-Bordnetze. Insbesondere gilt es, den breiten Arbeitstemperaturbereich von -40 °C bis +150 °C abzudecken. Gleichzeitig sollen sich die eingesetzten Produkte durch ihre hohe mechanische Stabilität gegen Schock und Vibration auszeichnen und eine Langzeitstabilität der elektrischen Eigenschaften aufweisen. Um Verluste zu minimieren, wird zudem erwartet, dass die Bauelemente eine möglichst hohe Effizienz bieten. Nur so lassen sich die geforderten hohen Wirkungsgrade der DC/DC-Wandler von bis zu 98 Prozent erfüllen.

• Kondensatoren

Kondensatoren werden als Speicher- und Glättungsbauelemente in den Zwischenkreisen der Wandler und Inverter benötigt und stabilisieren Spannungen. Hierfür kommen vor allem Aluminium-Elektrolyt- und Folien-Kondensatoren in Frage. Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren (Bild 28) in Axialtechnologie mit Nennspannungen von 63 Volt DC eignen sich besonders für die 48-Volt-Technik. Außerdem haben sie ein sehr robustes Design mit einer Schwingungsfestigkeit von bis zu 45 g.



Bild 38: Aluminium-Elektrolyt-Kondensator für 48-Volt-Bordnetze –
Quelle: Epcos



Bild 39: Multipin-Folien-Kondensator für Zwischenkreisanwendungen – Quelle: Epcos

Daneben bieten Folien-Kondensatoren in Multipin-Ausführung (Bild 39) für Zwischenkreisanwendungen eine besonders hohe Stromtragfähigkeit. Eine weitere Funktion der Kondensatoren ist die Entstörung. Dafür eignen sich ebenfalls Folien-Kondensatoren oder Vielschicht-Keramikkondensatoren (Bild 40). Letztere eignen sich zur Entstörung von Schaltvorgängen in der Inverterstufe oder mit hohen Kapazitäten auch für den Zwischenkreis in DC/DC-Wandlern.

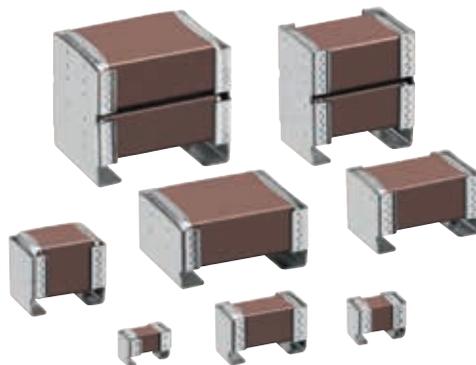


Bild 40: Keramik-Kondensatoren eignen sich als Snubber-Kondensatoren für IGBTs oder auch als Zwischenkreis-Kondensatoren in DC/DC-Wandlern – Quelle: TDK Corporation

Die wichtigste Aufgabe von Leistungsinduktivitäten (Bild 41) ist das kurzfristige Speichern von Energie in Form von magnetischer Energie. Sie sind als Speicherdrosseln Schlüsselbauelemente in Aufwärts- wie Abwärtswandlern von 48-Volt-Bordnetzen. So können etwa Hochleistungsinduktivitäten als Speicherdrosseln in DC/DC-Wandlern eingesetzt werden. Durch die Flachdrahtwicklung ergibt sich ein hoher Kupferfüllfaktor, der die Verluste reduziert.

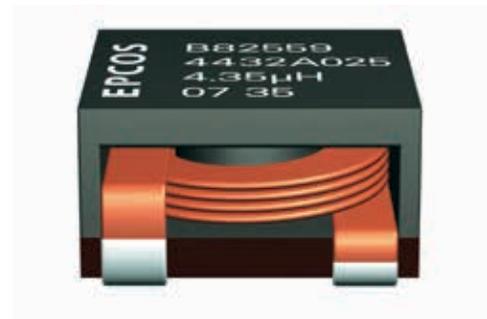


Bild 41: Hochleistungsinduktivität als Speicherdrossel für DC/DC-Wandler – Quelle: Epcos

Miniaturisierte Bauformen in SMD-Ausführung (Bild 42) dienen zur Unterdrückung von Störströmen in allen Baugruppen der Automobil-Elektronik. Diese Mini-Leistungsinduktivitäten werden als Speicherdrosseln in kleinen DC/DC-Wandlern eingesetzt oder zur Stromglättung in anderen Baugruppen. Durch die magnetische Schirmung ergibt sich eine hohe elektromagnetische Verträglichkeit.



Bild 42: Leistungsinduktivität als Speicherdrossel für kleinere DC/DC-Wandler oder zur Stromglättung in anderen Baugruppen – Quelle: Epcos



Bild 43: Stromkompensierte Drossel – Quelle: Vacuumschmelze

- **Filterdrosseln und stromkompensierte Drosseln zur EMV-Filterung**

Neben Speicherdrosseln zur Speicherung von elektrischer Energie existieren auch Filterdrosseln und stromkompensierte Drosseln (Bild 43) zur EMV-Filterung. Bei den stromkompensierten Drosseln (CMC) haben sich Lösungen mit nanokristallinen Kernen bewährt. Durch die hohen Ströme und die hierfür notwendigen Kupferleiter im Zusammenspiel mit Ringbandkernen auf Basis von nanokristallinem Band sind hier Einleiterlösungen eine gute Wahl. Die hohe Permeabilität des nanokristallinen Magnetwerkstoffes gewährleistet eine sehr gute Dämpfung über ein breites Frequenzspektrum mit einer sehr geringen Temperaturabhängigkeit.

- **Magnete**

Eine wichtige Kenngröße von Hybrid-Fahrzeugen ist deren möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad. In der Folge müssen auch Generatoren und Elektromotoren effizient und gleichzeitig gewichtssparend gebaut werden. Eine entscheidende Rolle fällt den dabei eingesetzten Magneten (Bild 44) zu. Neue Neodym-Magnete bieten eine mehr als 10fach höhere Energiedichte im Vergleich zu Ferrit-Dauermagneten. Erreicht werden diese hervorragenden Werte durch eine geringere Verunreinigung der magnetischen Materialien durch Oxide und eine wesentlich feinere Mikrostruktur.



Bild 44: Starke Neodym-Magnete für leistungsfähige Elektromotoren und Generatoren – Quelle: TDK Corporation

4. Fazit und Ausblick

Die Einführung einer zusätzlichen Spannungsebene im Automobil bietet vielversprechende Vorteile im Vergleich zu Hochvolt-Hybrid-Fahrzeugen. Einerseits erreicht man durchaus attraktive CO₂-Reduzierungen bei gleichzeitig vertretbaren Kosten, andererseits können Funktionen realisiert werden, die unter den gegenwärtigen 12-Volt-Bedingungen technisch nur schwer darzustellen sind. Dazu gehören elektrische Turbolader, Klimakompressoren und diverse Pumpen, die unabhängig von der Motordrehzahl betrieben werden. Somit ist es möglich, die Aktivierung der Lasten im Rahmen der jeweiligen Fahrzustände effizient zu steuern bzw. ein- und auszuschalten. Der Vorteil liegt in der Optimierung der dynamischen Größen der Fahrzeuge – elektrisch unterstützte Beschleunigung und umweltfreundliches Bremsen.

Diesen Nutzen wird der Fahrer unmittelbar spüren, Zugewinn der Antriebsleistung bei gleichzeitig reduziertem Kraftstoffverbrauch. Das ist sowohl für Fahrzeuge der Luxusklasse als auch in der Kompaktklasse von erheblicher Bedeutung.

Die technische Umsetzung der 48-Volt-Spannungsebene ist hinsichtlich der Integration in den Antriebsstrang im Vergleich zu Hochvolt-Hybriden einfacher zu realisieren, da im Wesentlichen bestehende Antriebsstrangkonzeppte beibehalten werden können. Daher ist bei der Umsetzung von kürzeren Entwicklungszeiten auszugehen. Natürlich besteht im Rahmen der Implementierung auf allen Ebenen die Notwendigkeit der Komponenten- und Systementwicklung sowie Systemintegration und Validation, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt bei den Automobilherstellern auf Hochtouren betrieben werden.

5. Abkürzungsverzeichnis

A

Ampere

AC

Wechselstrom/-spannung

Ah

Amperestunden

BDSG

Belt Driven Starter Generator

BEV

Battery Electric Vehicles

BG

Booster Generator

BN

Bordnetz

C

Celsius

CMC-Drosseln

Common Mode Choke (stromkompensierte Drossel)

DC

Gleichstrom/-spannung

DIN-EN

Deutsche Übernahme einer Europäischen Norm (EN)

EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit

EPS

Electric Power Steering, elektrische Lenkung

G

Generator

HSM

Hardware Security Module

HVAC

Heating, Ventilation and Air Conditioning

HV

Hochvolt

HV-Hybrid

Hochvolt-Hybrid

HVIL-Pilotlinie

High Voltage Interlock Loop-Pilotlinie

ICE

Internal Combustion Engine

ISG

Integrated Starter-Generator

Kfz

Kraftfahrzeug

kW

Kilowatt

M/G

Motor/Generator

LIN

Local Interconnect Network

MCU

Microcontroller Unit

MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Nfz

Nutzfahrzeug

OEM

Original Equipment Manufacturer

Pkw

Personenkraftwagen

PWM

Pulsweitenmodulation

RMS

Root Mean Square

RSG

Riemen-Starter-Generator

S

Starter

SOC

State of Charge

SOH

State of Health

V

Volt

VDA

Verband der Automobilindustrie

VDE

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informa-
tionstechnik

W

Watt



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org