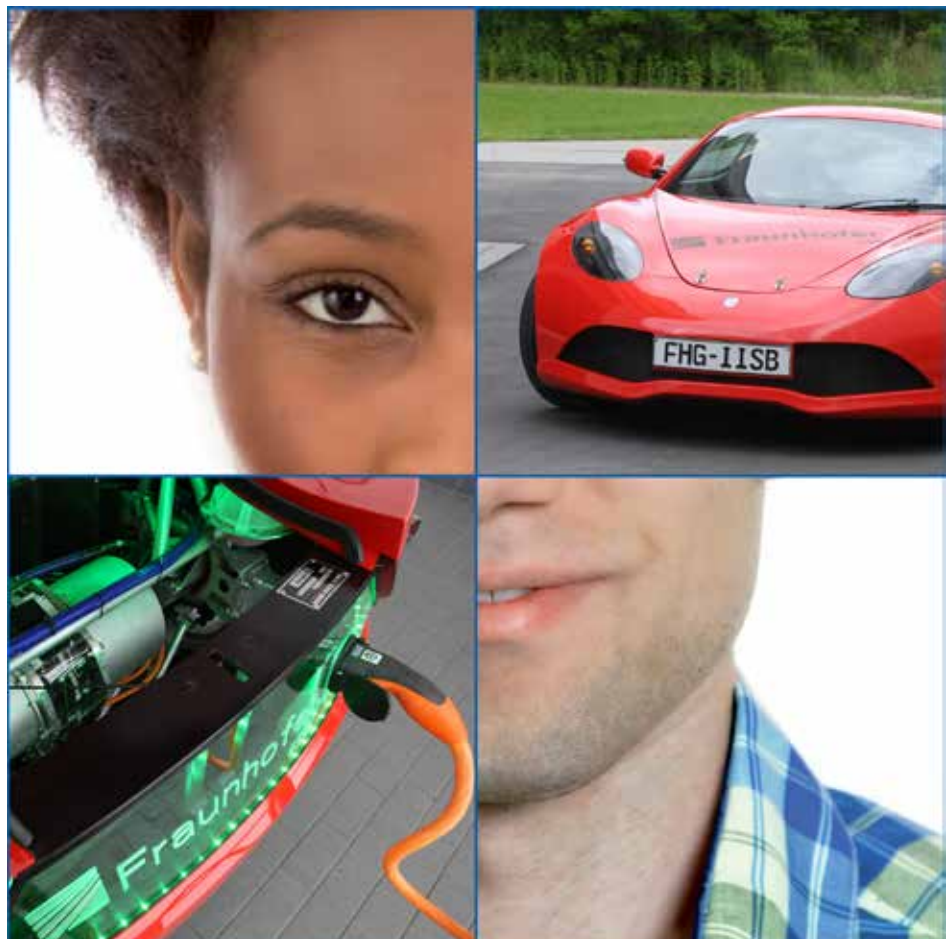


Spannungsklassen in der Elektromobilität

Ausgabe 2021





Spannungsklassen in der Elektromobilität **Ausgabe 2021**

Impressum

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und
Elektronikindustrie e.V.

Fachverband Electronic Components and Systems

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

Autoren:

ZVEI-Task Force Spannungsklassen:

Bertrandt

Coroplast Fritz Müller

Delphi Deutschland

Heraeus Materials Technology

Huber & Suhner

Infineon Technologies

Kostal Kontakt Systeme

Leopold Kostal

Lenze Schmidhauser

Leoni Kabel

Robert Bosch

Schweizer Electronic

TE Connectivity Germany

Tyco Electronics AMP

Webasto SE

Webasto Thermo & Comfort SE

Vancom

ZF Friedrichshafen

Juli 2021

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.

1 Adressatenkreis und Zielsetzung

Die Elektromobilität befindet sich in einer dynamischen Entwicklung. Dabei treffen neue technologische Ansätze auf klassisch bewährte, sowohl was Elektrotechnik und Elektronik, als auch was ihre Verbindung mit der klassischen Verbrennungsmotorentechnik betrifft.

Dieses Dokument soll einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und die Harmonisierung bzw. Standardisierung der erforderlichen Spannungsklassen geben. Es richtet sich an die Berufs- und Interessengruppen, die in Entwicklung, Technik, Produktion und Service mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs konfrontiert werden. Zudem soll es ZVEI-Arbeitsgremien und -Mitgliedern, die in Teilbereichen komponentenspezifisch arbeiten, dazu dienen, ihre Kenntnisse der Zusammenhänge aus Gesamtsystemsicht zu vertiefen.

Inhaltsverzeichnis

1	Adressatenkreis und Zielsetzung	3
	Inhaltsverzeichnis	4
2	Editorial	6
3	Technische Einleitung	8
4	48 V-Spannungsebene	11
5	Hochvolt	12
6	Anbindung an die Ladeinfrastruktur	12
7	Zusammenspiel verschiedener Spannungsebenen	13
8	Batterien	14
9	Leistungselektronik	16
10	Schütze	17
11	Energieverteilung	18
11.1	Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Spannungsklassen	18
11.2	Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Aufbaumerkmale	19
11.3	Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Deratingdefinition	20
11.4	Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Anforderungen	23
12	Hochvolt-Steckverbinder	25
12.1	Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung	26
13	Laderegler und DC/DC-Wandler	27
13.1	Laderegler	27
13.2	DC/DC-Wandler	28
14	Spannung der Antriebsmaschinen	29
15	Thermisches Management	30
16	Regularien, Normung & Standardisierung	30
17	Sicherheit: Gefährdungspotentiale im Umgang mit HV-Spannungen	31
17.1	Wirkung des elektrischen Stroms auf den Körper	31
17.2	Elektrische Sicherheit im Unternehmen	31
17.2	Elektrische Sicherheit im Unternehmen	31
17.3	Schutzkonzept	32
17.4	Schutzmaßnahmen	32

18	Lebensdauer	34
19	Offene Fragen	37
	19.1 Weitere Optimierungsgrößen	37
20	Zukunftsausblick und Fazit	38
21	Literaturhinweise	39
22	Abkürzungsverzeichnis	40

2 Editorial

Ein Blick in die Automobilgeschichte zeigt, dass viele der ersten nicht von Pferden bewegten Kutschen mit einem Elektroantrieb ausgestattet waren. Dass in den folgenden Jahrzehnten die Historie von Verbrennungsmotoren geprägt wurde, ist auf die erhebliche Entwicklungsarbeit zurückzuführen, die dazu führte, dass der Verbrennungsmotor seine anfängliche Pannenanfälligkeit und Bedienungsunfreundlichkeit überwand und praxis- und langstreckentauglich wurde. Heute aber, nach intensiver Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Elektromobilität, erfahren wir, dass mit dieser innovativen Technik nicht nur unter gewissen Gesichtspunkten wie Feinstaub- und CO₂-Reduzierung bei entsprechenden Strommix, dem Umweltschutz genüge getan werden kann, sondern wesentlich erhöhte Fahrdynamik und Fahrfreude damit einhergehen. Das lässt erwarten, dass zukünftig die Elektrifizierung des Antriebsstrangs weiter zunehmen wird und bei einer wachsenden Käuferschicht Interesse finden wird.

Das wieder erwachte Interesse an der E-Mobilität oder der Hybridtechnologie – und damit an elektrischen Antrieben – hat seinen Ausgangspunkt an umweltpolitischen Zielsetzungen. Mit der Markteinführung von allradgetriebenen Hybridfahrzeugen wurde jedoch deutlich, dass sich im Parallelbetrieb zweier unterschiedlicher Antriebstechnologien (thermischer Motor plus elektrische Maschine) beträchtliche Drehmomentwerte und damit beeindruckende Beschleunigungswerte erreichen ließen, bei gleichzeitiger Optimierung des Arbeitsbereichs der Verbrennungskraftmaschine. Damit wurde im Sinne der Technologieoffenheit eine weitere Möglichkeit der schrittweisen Erhöhung der elektrischen Fahranteile angeboten. Ein sich änderndes Umweltbewusstsein auf der einen, und einem politischen Druck auf der anderen Seite haben dazu geführt, dass es bei den Automobilherstellern eine grundlegende Neuausrichtung bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen etabliert hat. Die Akzeptanz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen hat stark zugenommen. Der hohe Anschaffungspreis gegenüber Verbrennungsmotoren und die psychologisch nicht zu unterschätzende Reichweitenangst stellen noch Hemmnisse dar, welche aber erwartungsgemäß durch den Zuwachs neuer Fahrzeugmodelle und den Ausbau der Ladeinfrastruktur reduziert werden.

Im April 2019 haben die EU-Staaten neue, nochmals stark reduzierte CO₂-Grenzwerte für Neuwagen beschlossen. Bis 2030 muss der Kohlendioxid-Ausstoß von Neuwagen um 37,5 Prozent im Vergleich zu 2021 reduziert werden. Dies ist nur mit einem starken Ausbau des E-Fahrzeuganteils erreichbar.

Hybridantriebe haben sich mittlerweile etabliert. Marktgerechter Wettbewerb führte zum Einzug dieser Technik in europäische und andere Fahrzeuge. Der damit einhergehende Entwicklungsboom traf auf eine Verfügbarkeit von Hochvolt (HV)-Komponenten, die zwar in der Militär- und der Flugzeugtechnik sowie in der Industrie und der Traktion (Straßenbahn und Züge etc.) Verwendung finden, aber die automobiltechnischen Anforderungen weit überschritten und nicht den preislichen Vorstellungen der Automobilhersteller entsprachen. Diese Komponenten fanden trotzdem zunächst in den frühen nichtasiatischen Hybridfahrzeugen Anwendung, wurden aber sukzessive durch geeignetere Komponenten ersetzt, die erst einmal spezifiziert, entwickelt und hergestellt werden mussten.

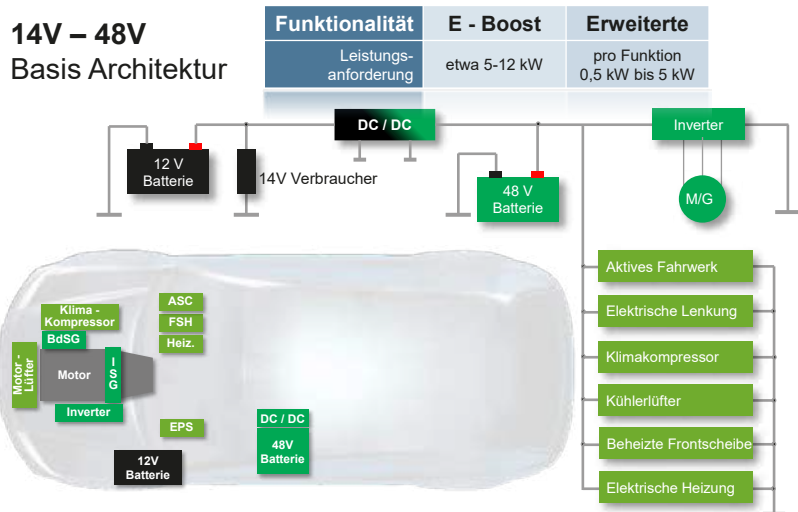
Heute steht uns eine Vielzahl von HV-Komponenten zur Verfügung, die die technischen Anforderungen erfüllen und preislich im automobilen Umfeld akzeptabel erscheinen. Es ist zu erwarten, dass in der Zukunft der Hybridantrieb und insbesondere der rein elektrische Antrieb neben den fahrdynamischen Vorteilen auch preislich an Attraktivität gewinnen werden.

Angesichts der Evolution der Hybridmechanisierungen bei Pfl und Nkw ist davon auszugehen, dass sich in naher Zukunft die folgenden Architekturen in den meisten Fahrzeugen wiederfinden werden, anschließend schematisch mit den zurzeit möglichen Optionen dargestellt (Abb. 1 – Abb. 3).

Die nachfolgenden Abhandlungen konzentrieren sich auf den aktuellen Stand der verschiedenen Spannungsebenen und deren Einsatz in Pkw und Nkw. Näher untersucht werden zudem die technischen Auswirkungen auf die in Hybridfahrzeugen eingesetzten Komponenten. Nicht betrachtet werden die Spannungsebenen innerhalb der E-Mobilitätsinfrastruktur.

Abb. 1: 14 V – 48 V Basis-Architektur

Herausforderungen und Lösungen zur Einführung von 48V Basis – Architektur Micro / Mild Hybrid

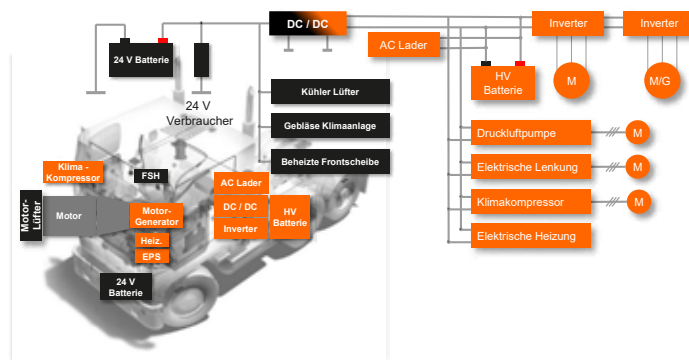


Quelle: Delphi Deutschland

Abb. 2: 24 V – HV – E/E-System, Hybrid-NKz

NKW Hybrid Architektur

24 V – HV – E/E System Hybrid-NKW

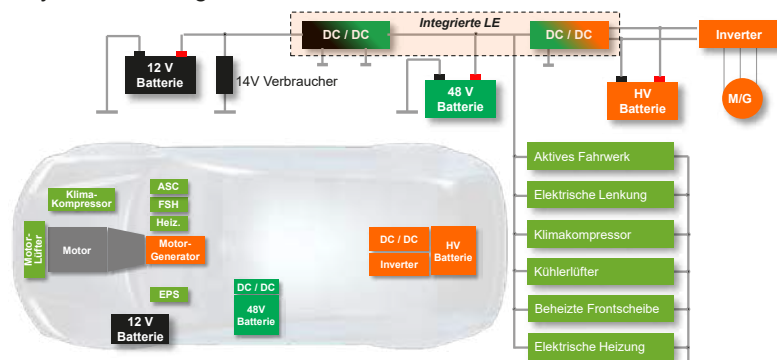


Quelle: Delphi Deutschland

Abb. 3: 14 V – 48 V – HV – E/E-System

Herausforderungen und Lösungen zur Einführung von 48 V im Hybrid – Fahrzeug

14 V – 48 V – HV – E/E System Hybrid-Fahrzeug



Quelle: Delphi Deutschland

3 Technische Einleitung

Hinsichtlich intensiven Engagements der Automobilindustrie, die Elektrifizierung des Antriebsstranges Wirklichkeit werden zu lassen, stellt sich im Hinblick auf die dazu notwendigen Anwendungen die Frage nach der technischen Umsetzbarkeit mit Fokus auf die zu verwendenden Spannungsebenen.

Waren bisher Spannungen größer 12/24 Volt und oberhalb der Kleinspannung Industrie- und Haushaltsapplikationen vorbehalten, so erfordert die elektrische Antriebsleistung in Pkz und Nkw bis hin zu einigen hundert Kilowatt höhere Spannungen, um die stromstärkenbedingten Leitungsquerschnitte noch handhabbar zu gestalten (Abb. 4).

Hinzu kommt die Notwendigkeit, Funktionen, die beim Betrieb thermischer Antriebsmaschinen heute mechanisch und weitestgehend permanent angetrieben werden, zukünftig losgelöst von Drehzahl und Drehmoment elektrisch und damit unabhängig vom Zustand und Verhalten der Verbrennungsmaschine (sofern vorhanden) zu betreiben.

Während die gängigen Spannungsebenen weitgehend durch den VDE standardisiert sind, fehlt zum jetzigen Zeitpunkt ein allgemein gültiger Standard für Abb. 6 Spannungsbereiche > 60 VDC im Automobil.

Abb. 4: Motor- und Batteriestrom – Systemspannung

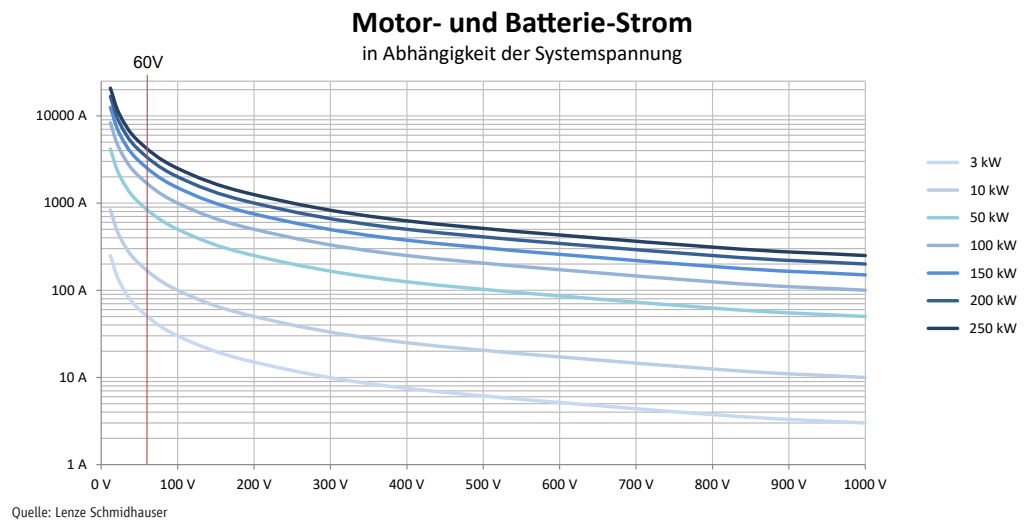


Abb. 5: Die Spannungen im 12 Volt-Bordnetz

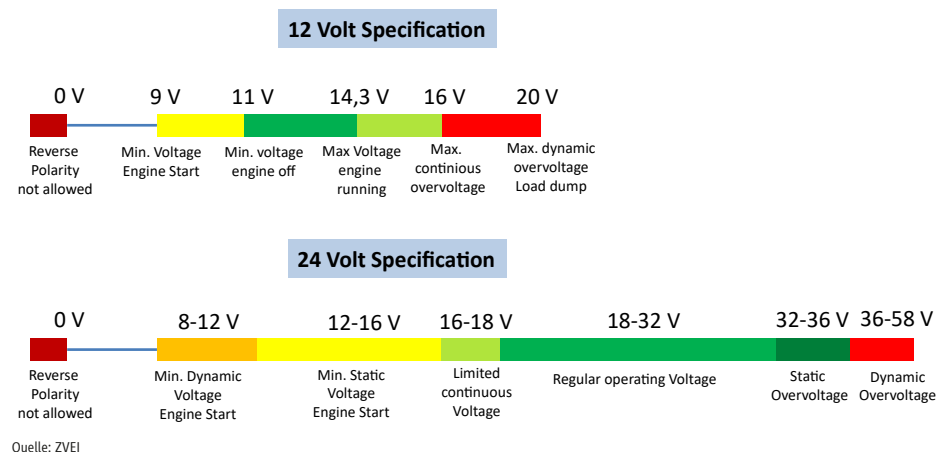
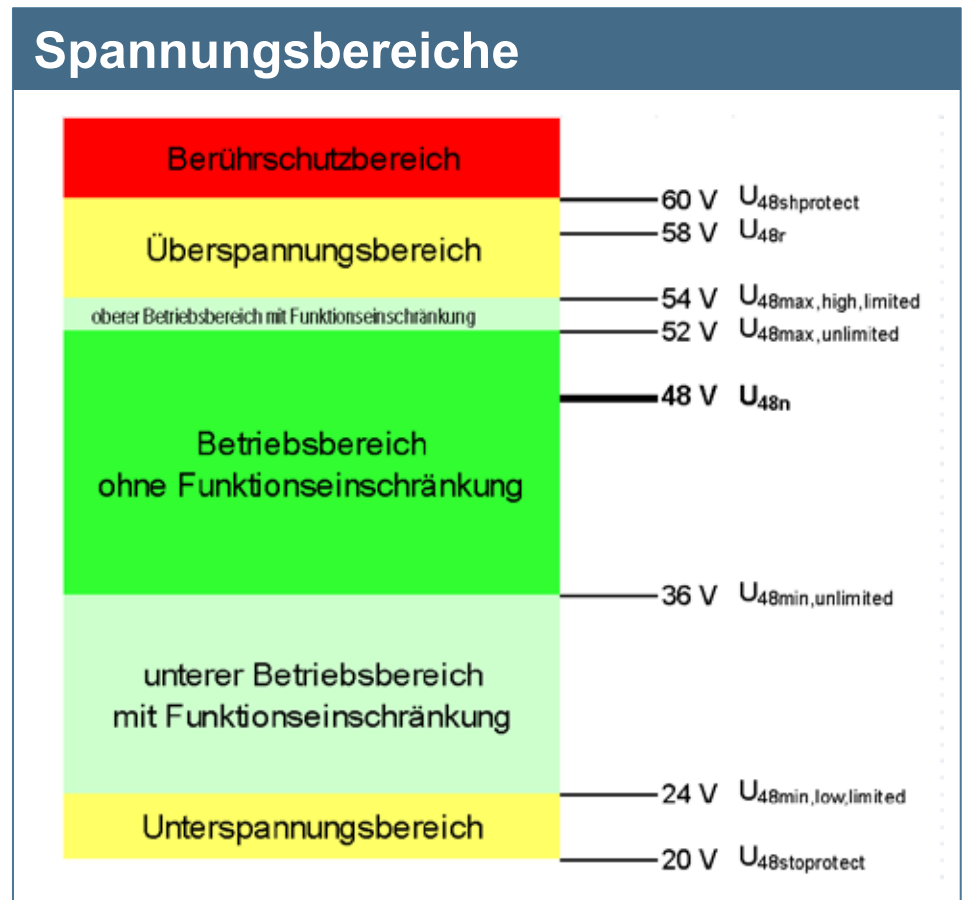


Abb. 6: Low Voltage-Bereich der Spannungen



Quelle: LV 148 (VW 82148 Ausgabe 2011-09)

Quelle: Delphi Deutschland

Hinzu kommt die Notwendigkeit, Funktionen, die beim Betrieb thermischer Antriebsmaschinen heute mechanisch und weitestgehend permanent angetrieben werden, zukünftig losgelöst von Drehzahl und Drehmoment elektrisch und damit unabhängig vom Zustand und Verhalten der Verbrennungsmaschine (sofern vorhanden) zu betreiben.

Während die gängigen Spannungsebenen weitgehend durch den VDE standardisiert sind, fehlt zum jetzigen Zeitpunkt ein allgemein gültiger Standard für die Spannungsbereiche > 60 VDC im Automobil.

Stand der Technik:

Die zurzeit gängigen 12/24 Volt-Ebenen dienen nach wie vor der Versorgung der meisten Fahrzeug- und Komfortfunktionen. Sie werden im Automobil auch weiterhin dafür Verwendung finden.

Bei den unterschiedlichen Elektro- und Hybridantrieben orientiert sich die Wahl der Spannungsebenen an den jeweiligen Applikationen innerhalb des elektrischen Antriebsstrangs, und der Nebenaggregate, was zu einer gewissen Individualität und Vielfalt führt.

Die elektrischen Architekturen und deren physikalische Realisierung sind den jeweiligen Anforderungen des Antriebsstranges angepasst. Eine Vereinheitlichung (Standardisierung) an dieser Stelle würde im Hinblick auf die Kosten den entscheidenden Beitrag leisten.

Höhere Spannungen- und damit niedrigere Ströme- bewirken tendenziell Kostenvorteile im Bereich der Energieverteilung (Steckverbinder, Kabelquerschnitte etc.). In der Batterietechnik wiederum werden aus Kostengründen niedrigere Spannungen bevorzugt, weil dadurch die Zahl der seriellen Zellen und deren Verbindungen reduziert werden

und der Aufwand für das Batteriemangement sinkt.

Die Wahl der (kosten-)optimalen Spannung ist ein übergreifendes Systemthema und kann allein aus Komponentensicht nicht zufriedenstellend beantwortet werden.

Während die elektrischen Antriebskomponenten in den Industrieanwendungen kostenintensive Reserven in der Auslegung auch in Bezug auf ihren Bauraum und die Dauerbelastbarkeit haben, ist dies im kostensensiblen und hochvolumigen Automobilbau nicht hinnehmbar. Zurzeit sind die elektrischen Architekturen und deren physikalische Realisierung individuell auf den jeweiligen Fahrzeugtyp zugeschnitten. Die Kostenoptimierung durch die mögliche Vereinheitlichung wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen, bevor sich in der Automobilentwicklung basierend auf positiven Erfahrungswerten vorteilhafte Strukturen und Komponenten durchsetzen werden. Einige Hersteller gehen verstärkt zu Plattformentwicklungen über und ermöglichen damit eine schnelle Skalierung, wobei die Integration von Mechanik und Elektronik eine zunehmende Funktionsverdichtung und damit eine Reduzierung der Variantenvielfalt und damit im ersten Schritt eine Quasistandardisierung ermöglichen.

Sicher ist, dass man hohe Spannungen benötigt, um Leistungen in der 100 kW-Liga zu transportieren, die die Stromwerte im Rahmen der physikalischen Realisierung in automobiltechnisch sinnvollen Grenzen halten.

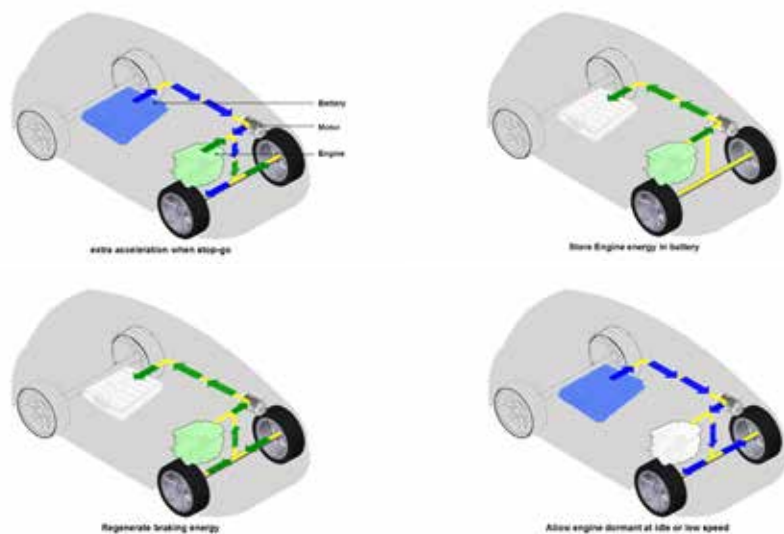
Zu übertragende elektrische Leistungen in dieser Größenordnung bei stationären oder mobilen Anwendungen wie Bahnen oder Gabelstaplern setzten bislang die Bedienung und Wartung durch elektrotechnisch geschultes Fachpersonal voraus. Bei der Nutzung von Pkzs wird diese Technik aber auch ungeschultem Personal und Endkunden zugänglich. Daher muss sichergestellt sein, dass diese vor unbeabsichtigtem Berühren von gefährlichen Spannungen geschützt sind. Das gilt für den normalen Betrieb des Fahrzeugs sowie beim Service in Werkstätten. Selbst im Falle eines Unfalls muss diese Sicherheit gegeben sein. Auf diesen Punkt wird an anderer Stelle noch eingegangen.

4 48 V-Spannungsebene

Bereits heute hat sich neben den beiden Ebenen 12/24 V und HV eine dritte Spannungsebene von 48 V etabliert. Sie ist u. a. für elektrische Aggregate bis zu 20 kW vorgesehen. Zu nennen sind zum Beispiel Start-Stopp-Funktion (Boost und Rekuperation), Klimakompressoren, elektrische Heizer, Pumpen, Lenkungsantriebe und in Zukunft sicherlich noch einige Funktionen (Audio u. a.) mehr. In manchen Kleinfahrzeugen z. B. im asiatischen Raum wird eine 48 V Spannungsklasse auch für den Hauptantriebsstrang genutzt. Ähnliche Tendenzen sind auch in Europa und den USA denkbar.

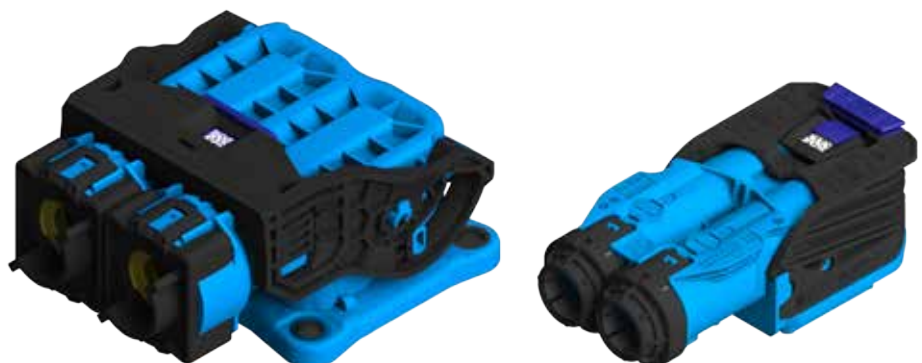
Technisch gesehen spiegelt die 48 V-Spannungsebene im Wesentlichen wider, was um die Jahrtausendwende im Hinblick auf die 42 V-Technologie erarbeitet wurde. Das ist aus heutiger Sicht zu begrüßen, da die damaligen Erkenntnisse zum großen Anteil übernommen werden können und man sich weiterhin unterhalb der VDE-Kleinspannungsgrenze ($< 30 \text{ VAC}$, $< 60 \text{ VDC}$) bewegt, was aufwendige Personenschutzmaßnahmen wie Berührschutz, Potentialausgleich und Isolationsüberwachung obsolet erscheinen lassen. Trotzdem wird optional im Bereich der Steckverbinder ein Überwachungskontakt vorgesehen, der das sogenannte „Hot Plugging“ verhindern soll. Im Gegensatz zum 12 V-Netz können im 48 V-Netz Lichtbögen auftreten, wenn eine bestromte Verbindung getrennt wird.

Abb. 7: 48 V – Betriebsmodi



Quelle: Kostal Kontakt Systeme

Abb. 8: 48 V-Stecker



Quelle: Kostal Kontakt Systeme

5 Hochvolt

Mit dem 12 V-Spannungsnetz ist man an die Leistungsgrenze für Verbraucher im automobilen Bereich gekommen. Um die elektrische Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wird die Spannung entsprechend den Anforderungen erhöht.

In der Pkz-Hybrid-Technik sind Batteriespannungen bis zu 400 Volt üblich, bei Nkz hingegen Spannungen bis zu 850 Volt. Diese Spannungen liegen in der Spannungsklasse B.

Die HV-Ebene beträgt max. $60 < U \leq 1500$ VDC;
 $30 < U \leq 1000$ VAC rms.

6 Anbindung an die Ladeinfrastruktur

Bei der Anbindung an die Ladeinfrastruktur unterscheidet man grundsätzlich zwischen der Möglichkeit eines Wechsel- oder eines Gleichstromanschlusses.

Beide Varianten sind in Ihren verschiedenen Ausführungsformen in der Normenreihe IEC 61851-x näher beschrieben. Im Falle der Einspeisung von Wechselstrom stehen je nach Land Nennspannungen zwischen 100 V und 240 V im ein-, zwei- oder dreiphasigen Betrieb zur Verfügung. Die Nennfrequenzen betragen 50 Hz oder 60 Hz. Der Wechselstrom wird mittels eines Onboard-Ladegerätes (OBC) oder eines speziellen, dafür ausgelegten Motorinverters in Gleichstrom umgewandelt und an die Erfordernisse der Fahrzeugbatterie bzw. des HV-Bordnetzes angepasst. Dabei wird häufig zugleich eine galvanische Trennung zwischen dem speisenden, in der Regel geerdeten Wechselstromnetz und dem als IT-Netz ausgeführten HV-Bordnetz herbeigeführt. Unter Berücksichtigung spezifischer Schutzvorkehrungen kann diese galvanische Trennung während des Ladevorgangs ggf. auch entfallen.

Das Laden mit Gleichstrom umfasst einen wesentlich größeren Spannungsbereich, da sich die Ladespannungen direkt nach der jeweiligen Fahrzeugbatterie richten. Die IEC 61851-23 deckt demzufolge den gesamten Niederspannungsbereich (im Sinne der Niederspannungsrichtlinie) bis 1.500 VDC ab.

In der Praxis haben sich marktseitig vor allem zwei Spannungsklassen etabliert: 200-500 V und 200-920 VDC. Ladespannungen > 1.000 VDC sind denkbar und könnten zukünftig vor allem vom schweren Nutzlastverkehr getrieben werden.

Im Interesse der Verfügbarkeit bieten Elektrofahrzeuge, die an sich eine Ladespannung > 500 V erfordern mittels eines Hochsetzstellers auch die Möglichkeit an Ladepunkten mit DC-Spannung < 500 V geladen zu werden.

Die gesamte Ladeinfrastruktur unterliegt im Geltungsbereich der Europäischen Union der Verpflichtung einer herstellereitigen Erklärung der EU-Konformität. Dazu sind eine Reihe von EU-Direktiven zu erfüllen, beispielhaft seien hier die 2014-35 EU (Niederspannungsrichtlinie), 2014-30-EU (EMV) und die 2014-94-EU (Infrastruktur) genannt. Im Rahmen der Konformitätserklärung werden für die Bewertung i. d. R. die einschlägigen harmonisierten Normen herangezogen.

Die fahrzeugseitigen Anforderungen an die Ladeschnittstelle sind in der ISO 17409 definiert.

7 Zusammenspiel verschiedener Spannungsebenen

Die in einem Fahrzeug zur Anwendung kommenden unterschiedlichen Spannungsebenen müssen voneinander getrennt, unabhängig und gleichzeitig arbeiten können. Für die einzelnen Spannungsebenen sind die gängigen Absicherungsverfahren anzuwenden, um den Leitungs- und Kurzschlusschutz sicher zu stellen. Das kann mittels Schmelzsicherungen oder durch elektronische Sicherungsverfahren erfolgen. Bei Auftreten von Fehlern zwischen zwei unterschiedlichen Spannungsebenen, erfordern Schutzbeschaltung und Detektion besondere technische Beachtung und eventuell zusätzliche Maßnahmen. Idealerweise sollten unterschiedliche LV-Spannungsebenen galvanisch getrennt sein. Zwischen HV- und LV-Netz(en) muss eine galvanische Trennung erfolgen. Höchstmögliche Sicherheit kann hier durch räumliche Trennung der Beschaltung in der Weise gewährleistet werden, dass diese möglichst wenige physikalische Berührungspunkte haben und damit der Spannungsschluss nahezu ausgeschlossen werden kann.

HV-Kabel und -Stecker sind bevorzugt in der Signalfarbe Orange zu kennzeichnen.

8 Batterien

An dieser Stelle wird lediglich ein kurzer Überblick zur Batterietechnologie gegeben. Detaillierte Ausführungen hierzu sind beispielsweise im Buch von Dr. Reiner Korthauer (Herausgeber) „Handbuch Lithium-Ionen-Batterien“, Springer Verlag, zu finden.

In konventionellen Automobilen werden seit vielen Jahrzehnten Blei-Akkumulatoren als Speicher elektrischer Energie eingesetzt. Sie arbeiten mit einer Nominalspannung von 12 V bis 14 V (Pkw) bzw. 24 V (Nkw).

Bei Elektro- und Hybridfahrzeugen werden heute meist Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion, LIB) eingesetzt. Haupttreiber für den Einsatz der Li-Ionen-Speicher ist ihre gegenüber dem Blei-Speicher um ein Vielfaches höhere Energiedichte (Wh/kg), durch die erst ein rein elektrisches Fahren in einem für den Alltagsgebrauch ausreichendem Maße ermöglicht wird. Allerdings sind auch die Preise für solche Speicher deutlich höher. Maßgeblich hierfür sind zum einen die Kosten zur Herstellung der Batteriezellen und zum anderen auch der regelungstechnische Aufwand, um einen Li-Ionen-Speicher für den Fahrzeugeinsatz nutzbar zu machen.

Die im Fahrzeug sinnvollerweise mitgeführte elektrische Energiemenge (Kapazität der Batterie) hängt maßgeblich von der angestrebten elektrischen Reichweite, dem Fahrzeuggewicht und dem dynamischen Verhalten (Beschleunigungsvermögen, Bremsen mit oder ohne Rekuperation) ab. Grundsätzlich ist zwischen dem reinen Elektrofahrzeug und Hybrid-angetriebenen Fahrzeugen zu unterscheiden. Elektrofahrzeuge haben häufig Kapazitäten im Bereich von

16 kWh bis 100 kWh, die mit parallel geschalteten Zellen oder Zellmodulen erreicht werden. Hybride Fahrzeuge haben hingegen meist eine stark begrenzte rein elektrische Reichweite, so dass hier Batterien mit deutlich geringerer Kapazität, meist im einstelligen kWh-Bereich, verwendet werden.

Darüber hinaus besteht ein Unterschied wie die Batteriezellen optimiert werden. Reine BEV haben meist energieoptimierte Zellen während HEV leistungsoptimierte Zellen nutzen.

Wichtige Kriterien für die Auslegung einer Batterie sind:

- Gravimetrische Energie (Wh/kg)
- Volumetrische Energie (Wh/l)
- Peak-Leistung (W/kg)
- Leistung bei Kaltstart (W/kg)
- Preis (Euro/kWh)

Die gesetzten Bedingungen bezüglich Lebensdauer, Qualität und Sicherheit sind dabei unabdingbare Voraussetzungen, die ebenfalls zu erfüllen sind.

Aufbau und Funktionsweise

Mechanisch werden die Batterie-Zellen zunächst zu einem Block aus mehreren Einzelzellen zusammengefasst. Mehrere solcher Blöcke bilden dann die Batterie. Hierbei ergibt sich die Gesamt-Batteriespannung aus der Anzahl der in Reihe geschalteten Batteriezellen multipliziert mit der Zellspannung einer Einzelzelle.

Die Zellspannung selbst bestimmt sich aus den verwendeten Kathoden- und Anodenmaterialien. Welche Materialien für die Elektroden zum Einsatz kommen, hängt auch von den Anforderungen hinsichtlich Temperaturstabilität, elektrischer Kapazität, möglicher Lade- und Entladeströme und Anzahl der Lade/Entladezyklen ab. Darüber hinaus spielt die Wahl von Elektrolyt und Separator ebenfalls eine wichtige Rolle.

Als Einzelzellenbauform kommen heutzutage zylindrische, prismatische und Pouch-Zellen zum Einsatz.

Bei Li-Ionen-Batterien liegen die Zellspannungen im Bereich von 3 V bis 4 V, so dass für eine Gesamtbatteriespannung von beispielsweise 500 V schon eine Vielzahl von Zellen in Reihe zu schalten ist.

„Elektrisch“ besteht die Batterie aus den Batteriezellen, der Blocküberwachung, dem sogenannten Batterie-Management-System und den Abschaltetelementen, die eine elektrische Freischaltung der Batterie vom Rest des Fahrzeugs gewährleisten müssen. Darüber hinaus ist häufig noch eine mechanische Trennmöglichkeit der HV-Batterie im Service/Wartungsfall bzw. bei einem Unfall vorgesehen.

Die Blocküberwachung übernimmt die Aufgabe, die Zellen so auszubalancieren, dass jede Zelle möglichst viel Energie aufnehmen bzw. abgeben kann. In Reihe geschaltete Batteriezellen haben nämlich das Verhalten, dass die „schwächste“ Zelle innerhalb der Reihe den Zeitpunkt für die Beendigung des Ladens- bzw. Entladens bestimmt. Der Ladevorgang ist dann beendet, wenn die schwächste Zelle voll ist bzw. vice versa im Entladefall die erste leer ist, obwohl die anderen Zellen noch Reserven hätten. Um auch die anderen Zellen möglichst gut laden bzw. entladen zu können, wird ein sogenanntes Cell-Balancing vorgenommen. Hierbei wird zwischen aktivem und passivem Balancing unterschieden. Beim aktiven Balancing wird Energie von einer Zelle in die andere aktiv umgeladen, während beim passiven Balancing lediglich überschüssige Energie in Wärme umgewandelt wird.

Das Batterie-Management-System (BMS) regelt den Entlade-bzw. Ladevorgang der Batteriezellen, d. h. es bestimmt, wie viel Strom in welcher Zeit von der Batterie bereitgestellt bzw. abgenommen werden kann.

Li-Ionen-Batterien haben einen gegenüber dem Fahrzeug-Betriebstemperaturbereich eingeschränkten Temperaturbereich. Niedrige Temperaturen erschweren das Aufnehmen bzw. Abgeben von Energie. Hohe Temperaturen lassen die Zellen schneller altern. Mithilfe von Kühlung bzw. Heizung muss das BMS dafür sorgen, dass die Batterietemperatur innerhalb des geeigneten Temperaturbereiches geregelt wird.

Das BMS übernimmt die Kommunikation innerhalb der Batterie-Submodule als auch gegenüber anderen Steuergeräten, wie der Lade-Einheit, dem DC/DC-Wandler und natürlich dem Inverter. Es bestimmt dabei auch Batteriekenndaten, wie beispielsweise State-of Charge, Depth-of-Discharge, State-of-Health), die auch anderen elektronischen Steuergeräten zur Verfügung gestellt werden.

9 Leistungselektronik

In Wechselrichtern und DC/DC-Wandlern werden Halbleiter eingesetzt, mit denen durch periodisches Ein- und Ausschalten die ausgangseitigen Spannungen mit geringen Verlusten verändert werden können. Damit können sowohl DC- als auch AC-Spannungsformen erzeugt und je nach Anwendung das Drehmoment oder die Drehzahl von E-Maschinen oder die DC-Ausgangsspannung eines Wandlers geregelt werden.

Sowohl das Schalten selbst als auch der zu schaltende Strom führen zu thermischen Verlusten, die über die Kühlflächen abgeführt werden müssen. Je höher die Umgebungstemperatur und je höher der Strom, desto größere Chipflächen sind notwendig. Allerdings unterscheiden sich die verwendeten Halbleiter und die eingesetzten Schaltungskonzepte in Bezug auf die stromabhängigen Durchlass- und die Schaltverluste. Insbesondere bei Wandlern führen höhere Schaltfrequenzen zu einer Reduktion der induktiven Bauteile; aber auch bei schnell drehenden elektrischen Maschinen sind hohe Schaltfrequenzen von Vorteil, weil damit die Verluste im Motor und Lärmemissionen reduziert werden.

Die heute verfügbaren Leistungshalbleiter wie IGBT's, MOSFET's oder SiC-Dioden wurden für stationäre und netzgebundene Anwendungen entwickelt und optimiert. Die in Anwendungen oberhalb 200V dominierenden IGBT's verfügen über Sperrspannungen von 600 V und 1200 V, so dass diese in allen Energieversorgungsnetzen der Welt eingesetzt werden können. Die Versorgungsnetze sind in zwei vorherrschende Spannungsstufen einzuordnen, die meist einphasige 220 V- bis 240 V-Stufe und die meist dreiphasige genutzte 380 V- bis 440 V-Stufe. Daraus ergeben sich Spannungsamplituden, die zu den genannten Sperrspannungen der IGBT führen. Aufgrund einer technisch bedingten Spannungsreserve können diese Halbleiter nicht bis zur Sperrspannung ausgenutzt werden. Es zeigt sich, dass diese Halbleiter für maximale DC-Spannungen von 420 V und 920 V geeignet sind.

Je höher nun die DC-Spannung gewählt wird, desto kleiner sind die für gleiche Leistung notwendigen Ströme, so dass diese Halbleiter an ihrer oberen Maximalspannung die maximale Leistung übertragen können. Umgekehrt werden

durch eine Reduktion der DC-Spannung die übertragbare Leistung proportional verkleinert und die Kosten pro kW erhöht.

In leistungselektronischen Komponenten wird die Blindleistung in Kondensatoren zwischengespeichert. Diese als Elektrolyt- oder Folienkondensatoren aufgebauten Kapazitäten gibt es fein abgestuft für verschiedene DC-Spannungen, so dass diese auch für mittlere Stückzahlen optimiert beschaffbar sind.

Auch bei Leiterplatten und bei der internen Verschaltung der Leistungskomponenten eines Wechselrichters gilt, dass eine Erhöhung der Spannung die Kosten reduziert, weil damit die notwendigen Ströme verkleinert werden können. Bei Leiterplatten und vor allem in den Halbleitern selbst müssen die auftretenden Maximalströme besonders beachtet werden, weil deren feine Strukturen bereits nach kurzer Zeit (0,1 sek. bis 10 sek.) die zulässigen Maximaltemperaturen erreichen. Im Gegensatz zu Motoren, Steckern oder Kabeln müssen daher Leistungshalbleiter oft für eine Dauerbelastung bei den geforderten Maximalströmen ausgelegt werden, so dass durch eine Reduktion der Maximalströme erhebliche Kosteneinsparungen möglich sind.

Bei Wechselrichtern und DC/DC-Wandlern ist die Beherrschung intelligenter Schaltungskonzepte eine wichtige Voraussetzung, um die Gesamtverluste und die EMV-Störungen niedrig zu halten.

10 Schütze

Im Bereich der elektromechanischen Komponenten wie z. B. Stecker und Schütze spielt die HV-Spannungsform und Höhe des Stromes bezogen auf die damit verbundenen Kosten eine wesentliche Rolle.

Die technische Anforderung an die Schütze besteht darin, die unter Spannung stehenden Komponenten im Bedarfsfall zu schalten (galvanisch zu trennen). Wesentliche Kenngrößen sind die Stromtragfähigkeit, die Maximalspannung und die Schaltleistung unter den maximal möglichen Lastbedingungen.

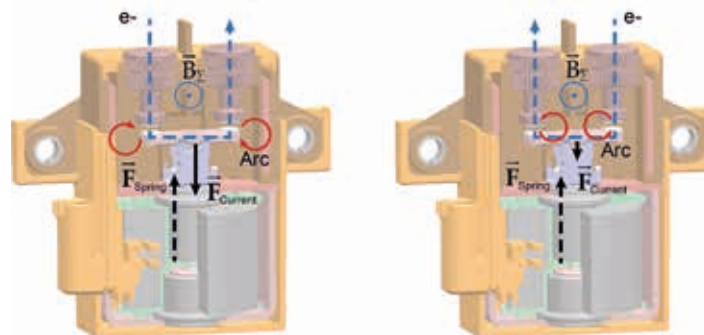
Um Stromspitzen während des Einschaltvorganges zu reduzieren, bedient man sich meist sogenannter Vorladerelais, die über einen Widerstand die Zwischenkreiskapazitäten der Leistungselektronik aufladen. Erst danach werden die Hauptschütze zeitlich versetzt sequentiell zugeschaltet.

Schütze übernehmen innerhalb von chemischen Energiespeichern gemeinsam mit HV-Sicherungen auch die Aufgabe des Kurzschluss-Schützes und müssen daher in der Lage sein, die bei einem Kurzschluss auftretenden Gleichströme sicher übertragen bzw. abzuschalten zu können. Die dabei auftretenden Schaltleistungen der Lastschütze errechnen sich durch das Strom-Spannungsprodukt im Lastabschaltfall und können Leistungen bis hin zu mehreren 100 kW betragen.

Daher müssen die Schaltelemente der Schütze in eine Umgebung eingebracht werden, die die Abrisslichtbögen minimieren, aber diese noch ausreichend lang wirken können, um eine zu hohe Abschaltspannungsspitze durch Induktion im Lastkreis vermeiden zu können, wie das z. B. durch hartes Schalten mit Halbleitern eintreten könnte. Das erreicht man durch Vakuum oder durch spezielle Gasfüllungen und zusätzlich durch magnetische Umlenkelemente im Bereich der Schaltkontakte, die die Lichtbögen von den Lastschaltkontakten ablenken. (Abb. 9: Lichtbogenhandling im Schütz abhängig von der Stromrichtung).

Diese magnetische Lichtbogen-Ablenkung ist physikalisch bedingt stromrichtungsabhängig, weshalb beim Einsatz von Schützen die Höhe des Stromflusses in Lade- und Entladerichtung der Batterie berücksichtigt werden muss. Diese technischen Maßnahmen tragen zu signifikant höheren Kosten im Vergleich zu 12 V-Relais bei. Eine technische Ergänzung im Sicherheitskonzept können pyrotechnische Trennstellen sein, die im Notfall (Kurzschluss oder Unfall) einen Leiter mittels eines Sprengsatzes irreversible durchtrennen. Die Abstimmung der sicherheitsrelevanten Zusammenarbeit zwischen HV-Schütz, HV-Sicherung und HV-Pyro-Trenner ist eine im Batterie Management System (BMS) angesiedelte Aufgabe, welche im Abschnitt Schutzmaßnahmen weiter erläutert wird.

Abb. 9: Lichtbogenhandling im Schütz abhängig von der Stromrichtung



Quelle: TE Connectivity Germany

11 Energieverteilung

11.1 Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Spannungs-klassen

sollten HV-Leitungen auch direkt an der Nomenklatur der Meterwaren erkennbar sein.

Die Namengebung „Hochvolt“ bezeichnet im Automobilsektor Nennspannungen oberhalb von 30 VAC und 60 VDC. Offiziell eingeführt wurde die Bezeichnung der HV-Leitungen mit der letzten Überarbeitung der DIN 76722 „Straßenfahrzeuge – Elektrische Leitungen – Regel für den Aufbau der Kurzbezeichnungen“ (Ausgabe Dez 2013) Tabelle 1. Auf Wunsch der fünf deutschen Fahrzeugsteller

Tabelle 1: Auszug DIN 76722

Bezeichnung	Bedeutung
FL „Fahrzeug-Leitung“	Spannungsklasse A nach ISO 6469-3 Nennspannung max. 30 / 60 Volt (AC / DC)
FHL „Fahrzeug-Hochvolt-Leitung“	Spannungsklasse B nach ISO 6469-3 Nennspannung max. 1.000 / 1.500 Volt (AC / DC)
FZL „Fahrzeug-Zünd-Leitung“	Nach ISO 3808 Zündspannungen 15.000 Volt bis ca. 50.000 Volt

Quelle: DIN 76722

Die Beschreibung der Spannungs-klassen im Fahrzeug mit die Unterteilung NV und HV erscheint aus Gründen der elektrischen Sicherheit sinnvoll. Sie verdeutlicht auch dem Laien das erhöhte Gefahrenpotential in Verbindung mit der höheren Spannung. Daher wird bei den unter HV-Spannung stehenden Komponenten die Signalfarbe „Orange“ verwendet.

Die Spannungs-klassen im Fahrzeug können in Anlehnung ISO 6469-3 wie folgend dargestellt werden.

HV-Leitungen verbinden im sogenannten HV-Bordnetz unterschiedlichste Komponenten, die für elektrische Antriebe und weitere Funktionen von Straßenfahrzeugen notwendig sind bzw. künftig notwendig werden.

Tabelle 2: Spannungs-klassen für Fahrzeugleitungen

Spannungs-klassen	AC		DC
	$U_{eff} (U_{RMS})$	U_{SS}	U_{DC}
Niedervolt	$\leq 30 \text{ V}$	$\leq 42 \text{ V}$	$\leq 60 \text{ V}$
Hochvolt	$\leq 600 \text{ V}$	$\leq 849 \text{ V}$	$\leq 1.000 \text{ V}$
	$\leq 1.000 \text{ V}$	$\leq 1.414 \text{ V}$	$\leq 1.500 \text{ V}$

Quelle: Entwurf LV 216-2: 5. Mai: Hochvolt-Mantelleitungen geschirmt für Kraftfahrzeuge und deren elektrische Antriebe

Die Definition der Spannungsklassen gemäß Tabelle 2 entspricht dem Standard der fünf deutschen Fahrzeughersteller. Leicht abweichend zu der o. g. Tabelle reduziert der internationale Standard für Fahrzeugleitungen ISO 19642 die zulässige.

DC Nennspannung von ≤ 1.000 V auf ≤ 900 V mit folgenden Definitionen:

60 V cable

cable intended for use in road vehicle applications where the nominal system voltage is ≤ 30 VAC or 60 VDC

900 V cable

cable intended for use in road vehicle applications where the nominal system voltage is ≤ 600 VAC or 900 VDC

1.500 V cable

cable intended for use in road vehicle applications where the nominal system voltage is ≤ 1.000 VAC or 1.500 VDC

Die spezifische Nennung der gültigen Spannungs-klasse von HV-Leitungen ist ebenso in der Nomen-klatur für Fahrzeugleitungen gemäß DIN 76722 definiert. Die Angabe der Nennspannung (AC und DC) sollte im Mantelbedruckungstext der jeweiligen Leitungen enthalten sein.

11.2 Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Aufbau-merkmale

Grundsätzlich wird unterschieden zwischen Leitungen zur Verteilung hoher elektrischer Lasten und Leitungen für den Betrieb weiterer HV-Applikationen.

Der Laststrang im HV-Bordnetz stellt in der Regel die elektrischen Verbindungen

- Ladeanschlussdose – Batterie (beispielhaft für DC-Laden)
- Batterie – Leistungselektronik
- Leistungselektronik – eMotoren

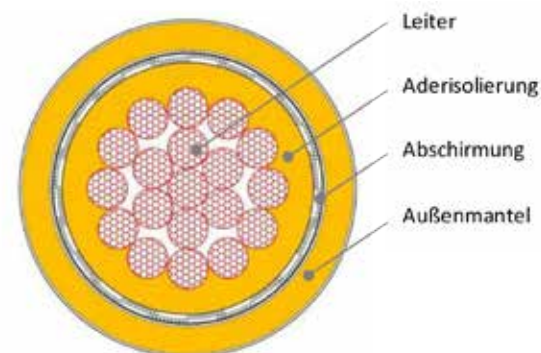
dar. Zum Einsatz kommen hier einadrige HV-Leitungen, die vergleichend hohe Strombelastungen übertragen. Je nach Applikation sind Leiterquerschnitte

von 2,5 mm² bis 120 mm² im Einsatz. Aus Gründen der höheren elektrischen Leitfähigkeit überwiegt aktuell der Einsatz von Kupfer als Leiterwerkstoff. Die potenzielle Gewichtseinsparung des Leiterwerkstoffes Aluminium wird grundsätzlich immer mit dem dadurch notwendigen Einsatz größerer Leiter-nennquerschnitte und dem dadurch resultierenden höheren Bauraumbedarf abgestimmt.

Grundsätzlich kommen abgeschirmte HV-Leitungen zum Einsatz. Die Abschirmtechnologie wird aus Gründen der elektromagnetischen Abstrahlung und Verträglichkeit notwendig. In der Praxis sind abgeschirmte HV-Leitungen mit einer doppelten Abschirmung (Abschirmgeflecht und Abschirmfolie) oder einfacher Schirmung (Abschirmgeflecht) ausgerüstet. Die Schirmungs-anforderungen sind global nicht standardisiert. EMV-Anforderungen, wie z. B. Transferimpedanz ($f < 2$ MHz) und Schirmdämpfung ($f > 2$ MHz), müssen zwischen Fahrzeug- und Meterwarenhersteller vereinbart werden. Zudem ist zu beachten, dass der Kupferquerschnitt der Schirmung eine angepasste Größe haben sollte, da bei AC-Anwendung durch elektromagnetische Effekte residente Schirmstrombelastungen generiert werden können.

Nicht geschirmte HV-Leitungen werden in Architek-turen verwendet, deren HV-Bordnetze mit gesonder-ten EMV-Filtermaßnahmen ausgestattet sind.

Abb. 10: HV-Leitung, einadrig geschirmt



Quelle: Coroplast Fritz Müller

Mehradrige HV-Leitungen werden benötigt um elektrische Aggregate, wie z. B. Klimakompressoren und elektrische Zusatzheizer zu betreiben. Im Ladeanschlussstrang stellen die mehradrigen HV-Leitungen die AC-Verbindung zwischen der Ladeanschlussdose und dem Wechselrichter dar. Der Leiterwerkstoff Kupfer wird weiterhin als Standard für mehradrige HV-Leitungen gesehen. Grundsätzlich sind zwei- bis fünfadrig HV-Leitungen im Serieneinsatz. Für einzelne Anwendungen kann diese Aderanzahl variieren.

Einheitliche HV-Leitungsdimensionen, als geometrische Schnittstelle zu den HV-Steckverbindern, wurden erstmalig im deutschsprachigen Raum mit den fünf deutschen Fahrzeugherstellern vereinbart und in deren Werksnormen überführt. Unverbindliche Richtwerte bzw. Richtlinien zur Festlegung von Leitungsdimensionen sind in der ISO 19642 definiert.

Abb. 11: HV-Leitungen, mehradrig geschirmt



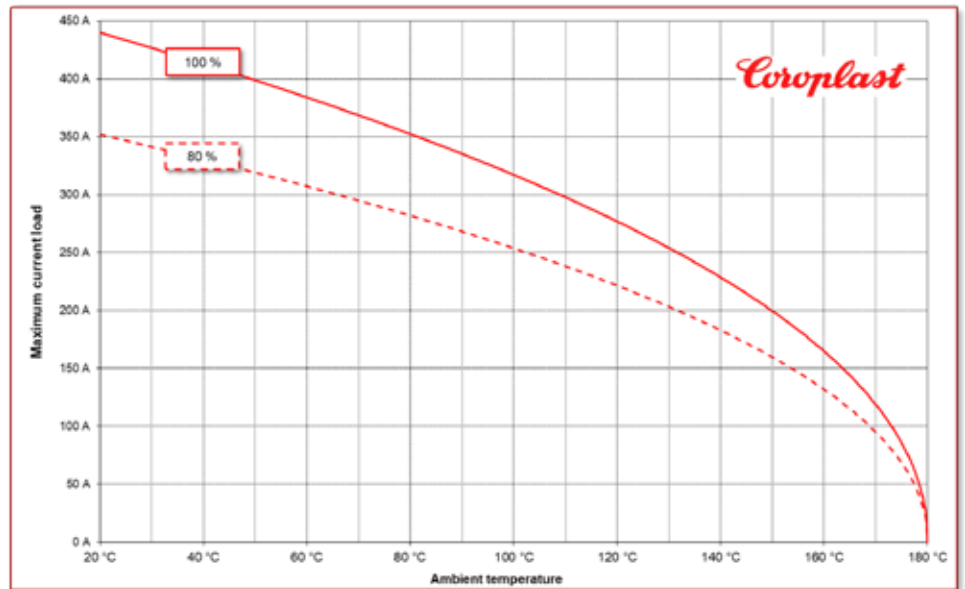
Quelle: Coroplast Fritz Müller

11.3 Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Deratingdefinition

Die Wahl der Nennquerschnitte von HV-Leitungen muss in erster Ableitung von der applikationsseitigen Strombelastung abhängig gemacht werden. Die Strombelastungsfähigkeit elektrischer Leitungen wiederum ist u. a. auch abhängig von der jeweiligen Umgebungstemperatur und von der thermischen Performance der gewählten Isolier- und Mantelwerkstoffe. Das jeweilige Fenster zwischen der Umgebungstemperatur und der thermischen Belastungsfähigkeit der HV-Leitung definiert in erster Ableitung die Strombelastungsfähigkeit dieser HV-Leitung. In folgenden Grenzwertkurven sind zur Erläuterung zwei beispielhafte Nennquerschnitte 16 mm² und 50 mm² dargestellt.

Abb. 12: Grenzwertkurven HV-Leitung Kupfer 50 mm² / T180

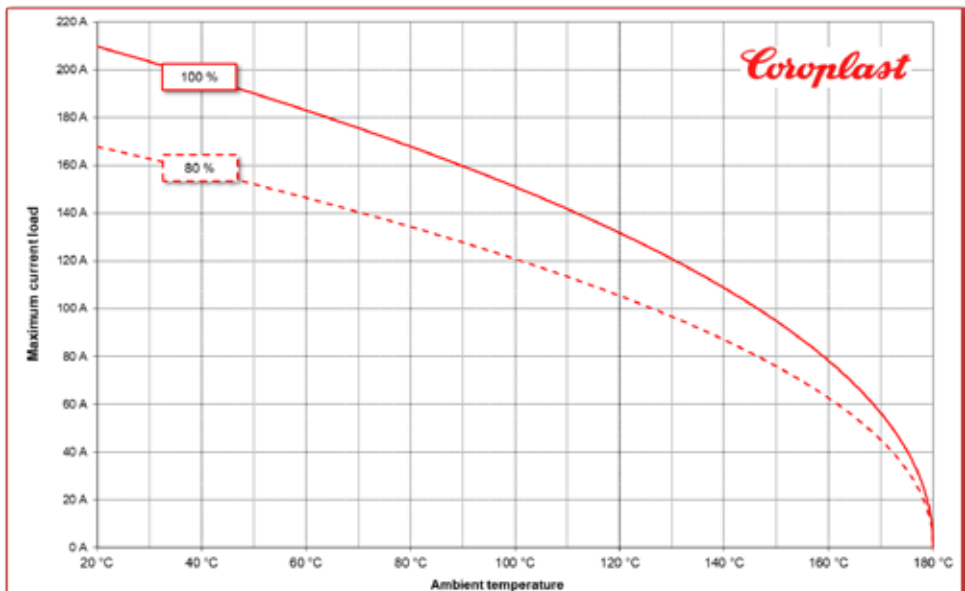
(Y-Achse mit 100 Prozent und 80 Prozent Angabe der zulässigen thermischen Dauerbelastungsgrenze)



Quelle: Coroplast Fritz Müller

Abb. 13: Grenzwertkurven HV-Leitung Kupfer 16 mm² / T180

(Y-Achse mit 100 Prozent und 80 Prozent Angabe der zulässigen thermischen Dauerbelastungsgrenze)



Quelle: Coroplast Fritz Müller

Die oben gezeigte Darstellung der Grenzwertkurve stellt Strombelastungsfähigkeiten im statischen, also im eingeschwungenen Zustand dar. Praxisorientiert und eher praktikabel ist sehr häufig die technische Diskussion zur Auswahl von Nennquerschnitten in Abhängigkeit von s. g. dynamischen Bestromungsprofilen. Folgende Kurvenschar stellt das dynamische Stromeerwärmungsverhalten von drei HV-Leitungen mit unterschiedlichen Nennquerschnitten 25 mm², 35 mm² und 50 mm² an einem dynamischen Bestromungsprofil dar.

In Abhängigkeit der resultierenden Leitertemperaturen und weitergehenden Applikationsanforderungen besteht mit dieser Darstellung des dynamischen Stromeerwärmungsverhalten eine Möglichkeit, Nennquerschnitte zur weiteren Erprobung zu wählen.

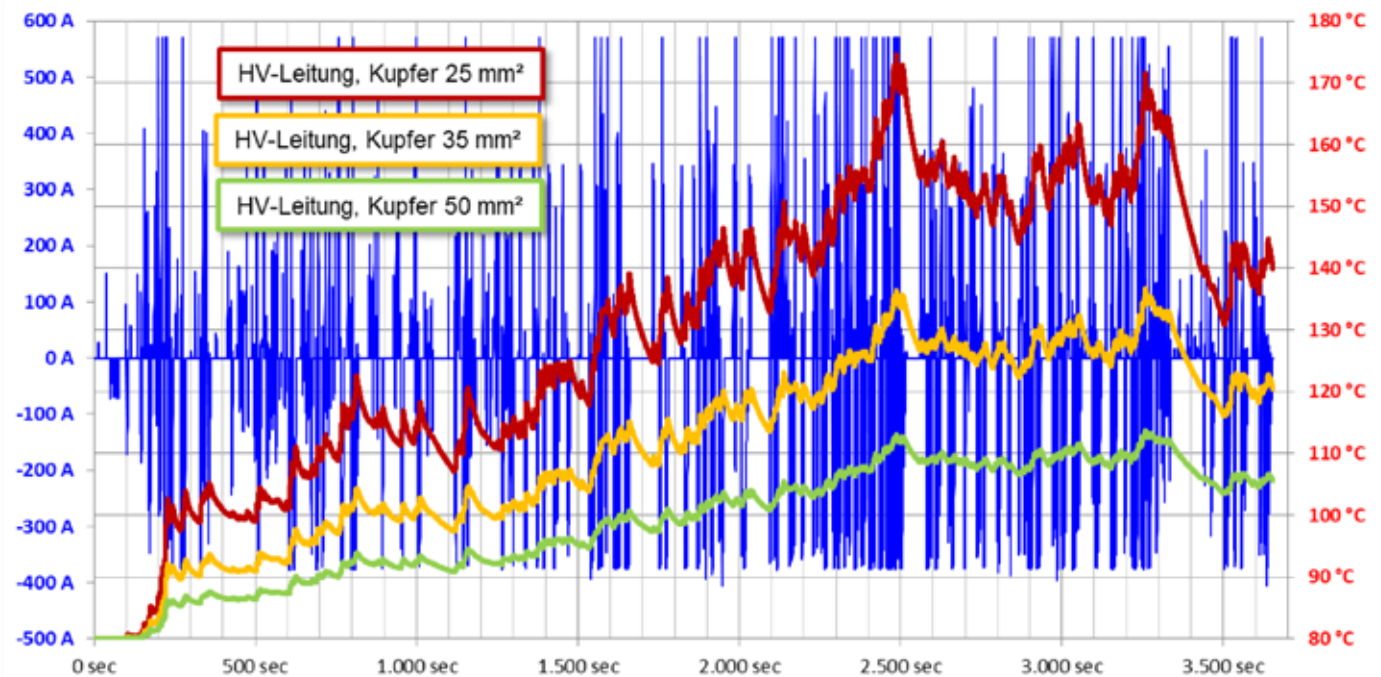
Zur Einsparung von notwendigen Bauräumen, Leitungssatzgewichten und resultierenden Kosten empfiehlt es sich in erster Abhängigkeit Leiternennquerschnitte auf ein Minimum zu reduzieren bzw. zu optimieren.

Ergänzend wird in diesem Zusammenhang auf den Umstand hingewiesen, dass o. g. Strombelastungskurven ausschließlich unendliche lange HV-Leitungen ohne angeschlossene Kontaktierungen und ohne mechanische Schutzsysteme darstellen. Die Einflüsse z. B. von Übergangswiderständen der elektrischen Kontaktierungen oder von thermisch isolierenden Luftanteilen innerhalb von mechanischen Schutzsystemen muss individuell für die jeweilige Applikation anhand von Simulationen oder Messungen ermittelt werden.

Weitergehende Erläuterungen können im Kapitel 15 „Thermisches Management“ nachgelesen werden.

Abb. 14: Dynamisches Stromeerwärmungsverhalten HV-Leitungen Kupfer 25 mm² bis 50 mm²

(Y1-Achse: Strombelastung, X-Achse: zeitlicher Verlauf der Strombelastung, Y2-Achse: resultierende Leitertemperatur)



Quelle: Coroplast Fritz Müller

In Abhängigkeit der resultierenden Leitertemperaturen und weitergehenden Applikationsanforderungen besteht mit dieser Darstellung des dynamischen Stromerwärmungsverhalten eine Möglichkeit, Nennquerschnitte zur weiteren Erprobung zu wählen.

Zur Einsparung von notwendigen Bauräumen, Leitungssatzgewichten und resultierenden Kosten empfiehlt es sich in erster Abhängigkeit Leiter-nennquerschnitte auf ein Minimum zu reduzieren bzw. zu optimieren.

Ergänzend wird in diesem Zusammenhang auf den Umstand hingewiesen, dass o. g. Strombelastungskurven ausschließlich unendliche lange HV-Leitungen ohne angeschlossene Kontaktierungen und ohne mechanische Schutzsysteme darstellen. Die Einflüsse z. B. von Übergangswiderständen der elektrischen Kontaktierungen oder von thermisch isolierenden Luftanteilen innerhalb von mechanischen Schutzsystemen muss individuell für die jeweilige Applikation anhand von Simulationen oder Messungen ermittelt werden.

Weitergehende Erläuterungen können im Kapitel 15 „Thermisches Management“ nachgelesen werden.

11.4 Hochvolt-Leitungen für Straßenfahrzeuge – Anforderungen

Basisanforderungen für HV-Leitungen sind in den einschlägigen nationalen und internationalen Standards beschrieben. Folgend beschrieben werden drei beispielhafte normative und weitergehende Anforderungen von HV-Leitungen.

Biegeradien

Bedingt durch fehlende Bauräume im Fahrzeug ist die Bedeutung der zulässigen Biegeradien von HV-Leitungen als hoch anzusehen.

Unterschieden wird in der Definition zwischen zulässigen Biegeradien für die statische Verlegung und der dynamischen Verlegung.

Definition statische Verlegung:

- Die Verlegung der Leitung, inklusive Befestigungen, erfolgt auf einer Bewegungsebene.
- Es sind keine Relativbewegungen zwischen den verschiedenen Befestigungspunkten der Leitung zugelassen.
- Der kleinste zulässige Biegeradius für statische Verlegung im Fahrzeug entspricht als Sollanforderung z. B. $R_{min} = 3 \times D$ (maximal spezifizierter Außendurchmesser der Leitung).
- Die Prüfung dieser Sollanforderung erfolgt im Rahmen von thermischen Alterungen der HV-Leitungen im gewickelten Zustand.

Definition dynamische Verlegung:

- Die Verlegung der Leitung, inklusive Befestigungen, erfolgt auf verschiedenen Bewegungsebenen im Biegebereich.
- Relativbewegungen zwischen den verschiedenen Befestigungspunkten der Leitung können auftreten.
- Für den Anwendungsfall im Fahrzeug ist der minimale Biegeradius mit den jeweiligen Fachabteilungen abzustimmen.
- Als Richtlinie gilt z. B. $R_{min} = 6 \times D$ (maximal spezifizierter Außendurchmesser der Leitung).
- Aufgrund komplexer Applikationsabhängigkeiten sind standardisierte Prüfungsmethoden aktuell noch nicht verfügbar.

Der Trend zu minimalen Biegeradien ist weiterhin ungebrochen. Als Voraussetzung kann gesehen werden, dass im Leitungssatz entstehende Vibrationsbelastungen und biegedynamische Momente wenn möglich nicht direkt in HV-Steckkontakten weitergeleitet werden sollten.

Kontaktierung der elektrischen Leiter:

Das mechanische Crimpverfahren ist seit vielen Jahren in der Herstellung von Leitungssätzen für Straßenfahrzeuge als Standard etabliert. Bedingt durch steigende Kurz- und Langzeitstrombelastungen erhöht sich die Wichtigkeit von reduzierten Übergangswiderständen zwischen den elektrischen Leitern der HV-Leitungen und den HV-Steckkontakten. Daher ist als weiterer Standard heute ein Trend zur intermetallischen Verbindungstechnologie des Leiters zum Terminal des Steckkontaktes erkennbar.

Nach Stand der aktuellen Entwicklungen werden Aluminiumleiter der größeren Querschnitte nur intermetallisch verbunden. Als industrieller Standard kristallisiert sich hier das Ultraschallschweißverfahren heraus.

Elektrische Sicherheit:

Die elektrische Sicherheit beschreibt Anforderungen an HV-Leitungen im HV-Bordnetz über den vollständigen Lebenszyklus der Straßenfahrzeuge.

Elektrische Eigenschaften von HV-Leitungen werden im Rahmen der Qualifizierung sowohl im Anlieferzustand als auch nach bekannten Alterungskonditionen, wie z. B.

- Langzeitalterung 3.000 h @ TO
- Kurzzeitalterung 240 h @ TO + 25 °C und
- Thermische Überlast 6 h @ TO + 50 °C

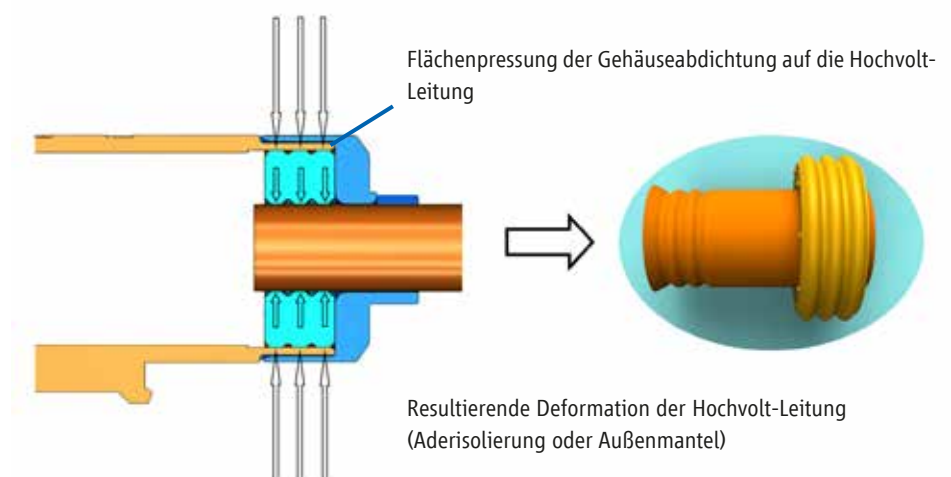
geprüft. TO stellt dabei die Temperaturklasse der jeweiligen HV-Leitung dar. Die elektrischen Prüfspannungen sind in der Regel wesentlich höher als aktuelle Nennspannungen der HV-Bordnetze:

- 240 Minuten: 1.000 V a.c. und anschließend
- 5 Minuten: 5.000 V a.c.

Im Rahmen der Produktion von HV-Leitungen werden die elektrischen Isolierungen mit Prüfspannungen von bis zu 8.000 V a.c. inline auf eventuelle Beschädigungen geprüft.

Einen wichtigen Beitrag zur elektrischen Sicherheit von HV-Leitungen im HV-Bordnetz stellt das Abdichtungsverhalten gegen Feuchtigkeit dar. HV-Leitungen werden größtenteils mit montierten Gehäuseabdichtungen (Seals) gegen potenzielle Feuchtigkeitseinbrüche in HV-Steckern abgedichtet. Die Seals pressen sich dauerhaft gegen die elektrische Aderisolierung oder dem Außenmantel der HV-Leitungen. Das Zusammenspiel zwischen der resultierenden Flächenpressung und den verbleibenden Deformationen der HV-Leitung stellt das Abdichtungsverhalten im System dar.

Abb. 15: Abdichtung von HV-Leitungen zu HV-Steckern mit montierten Gehäuseabdichtungen



Quelle: Kostal Kontakt Systeme

12 Hochvolt-Steckverbinder

Um die Nutzung unter den vielen möglichen Einsatzbedingungen zu gewährleisten, wurden mehr als 50 Produktanforderungen festgelegt z. B. maximale Betriebsspannung 850 V, Berührungsschutz nach IPX2B (VDE-Finger), voreilender Signalkontakt (HVIL), EMV-Anforderung mit hohen applikationsbedingten Schirmströmen. Zusätzlich wurde eine Einteilung der HV-Steckverbinder in verschiedene Leistungsklassen über Leitungsquerschnitt und Stromtragfähigkeit definiert. Viele dieser Produktanforderungen haben auf die konstruktive Auslegung der HV-Steckverbinder einen großen Einfluss und wurden bisher in dieser Kombination noch nicht gefordert [1 bis 6].

Der Pfad der Ladesteckdose bei Batterie und Plug-In Fahrzeugen stellt eine Besonderheit bezüglich der normativen Auslegung dar. Die Trennung des fahrzeuginternen HV-Kreises vom Versorgungsnetz findet bei AC-Ladung meist im internen Ladegerät statt, bei DC-Ladung innerhalb der Batterie.

Ladesteckdose:

Die standardisierten Ladesteckdosen nach IEC 62196-1/-2 [6, 7] unterscheiden drei Typklassen. Alle Typen werden mit 10.000 Steckzyklen unter Verschmutzungsbedingungen getestet. Die maximale Umgebungstemperatur beim Ladevorgang ist mit 50 Grad Celsius spezifiziert. Die Glühdrahtbeständigkeit der Ladesteckdose erfordert besondere Materialzusätze, die die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Eigenschaften verschlechtern. Steckverbinder im Fahrzeug-HV-System haben diese Anforderung außerhalb der Batterie nicht.

Bei der Ladesteckdose Typ 2 beträgt die maximale Spannung 500 VAC. Der dargestellte Aufbau ermöglicht die Übertragung von bis zu 70 A einphasig oder bis zu 63 A dreiphasig. Eine gleichzeitige Bereitstellung einer DC-Lademöglichkeit mit bis zu 200A wurde durch den Combined Charging Standard (CCS) geschaffen, der mit der High Power Charging (HPC) Erweiterung unter sensorisch kontrollierten thermischen Bedingungen nunmehr eine Leistung bis zu 350 kW übertragen kann (Abb. 18).

Der Dreiphasenstecker (Abb. 16) verbindet die Typ 2 Ladesteckdose mit dem internen Ladegerät und somit das HV-Bordnetz mit dem Energieversorgungsnetz.

Abb. 16: Dreiphasenstecker für den Ladewandler im Fahrzeug



Quelle: TE Connectivity Germany

Abb. 17: Typ 2 Ladesteckdose



Quelle: TE Connectivity Germany

Abb. 18: Typ 2 Combined Charging System (CCS), Ladesteckdose, IEC 62196-3



Quelle: TE Connectivity Germany

12.1 Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung

Innerhalb der Vielzahl unterschiedlicher HV-Stecker gibt es Lösungen, die das schnelle Öffnen der Steckerkontakte mittels einer speziellen Verriegelung verhindern. Hintergrund ist die Entladezeit der Kondensatoren der Leistungselektroniken auf einen ungefährlichen Spannungswert. Um dies zu gewährleisten, bevor die Kontakte berührt werden können, besitzen diese Stecker eine Verriegelung, die nur einen zeitverzögerten Zugang zu den Kontakten zulässt. Diese Sicherheitsmaßnahme kann aber auch systemisch verschieden gelöst werden.

Abb. 19: HV-Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung



Quelle: Kostal Kontakt Systeme

Um zukünftige HV-Steckverbinder und Terminals weiter für die Anforderungen des HV-Bordnetzes zu optimieren, muss ein ganzheitlicher Systemansatz gewählt werden. Dieser Ansatz betrachtet den Steckverbinder nicht mehr allein als verbindendes Glied zwischen den Komponenten, sondern bezieht ihn in die Auslegung des Gesamtsystems mit ein. Heutige Derating-Kurven stellen Laborwerte zur Verfügung, die nur eine Indikation der Stromtragfähigkeit unter realen Fahrzeugbedingungen geben. Weiterführende Systembetrachtungen erlauben z. B. geringere Leitungsquerschnitte und somit Gewichts- und Kosteneinsparungen im Gesamtsystem. Hierzu gibt es eine im ZVEI angesiedelte Initiative, die mittels thermisch-elektrischer Äquivalenzmodelle eine dynamische Simulation der elektrischen Belastungsfälle ermöglicht und frühzeitig die richtige systemische Auslegung von Komponenten im HV-Bordnetz ermöglicht.

13 Laderegler und DC/DC-Wandler

13.1 Laderegler

Neben der sich etablierenden DC-Ladefunktion werden Elektrofahrzeuge als auch Plug-In-Hybridfahrzeuge mit On-Board-Ladegeräten ausgestattet, die dem Benutzer eine flächendeckende Versorgung mit elektrischer Energie garantieren sollen. Für diese Ladegeräte entwickeln sich die Leistungsklassen von 7,2 kW bis 11 kW zum Standard. Daneben existieren aber auch 3,6 kW Geräte, die sicherlich für Plug-In-Hybride ihre Berechtigung haben, sowie 22 kW-Ladegeräte, mit denen ein deutlich performanteres Laden möglich ist.

Abb. 20: Laderegler 11 kW



Quelle : Leopold Kostal

Eine besondere Anforderung an die Ladegeräte ist die Einhaltung der elektrischen Sicherheit. Herausfordernd ist dabei, dass die Ladegeräte weltweit an beliebigen Installationen und Netzformen funktionieren sollen, wobei die Verfügbarkeit durch die Sicherheitsfunktion jedoch möglichst nicht eingeschränkt werden soll. Aus dem Grund werden heute galvanisch trennende Ladegeräte verbaut, die eine sichere Trennung des Versorgungsnetzes vom HV-Bordnetz des Fahrzeugs gewährleisten.

Bei allen Leistungsklassen ist der Ruf nach hohen Wirkungsgraden zu vernehmen, da dadurch die CO₂-Bilanz der Fahrzeuge besser ausfällt und sich so ein wirtschaftlicher Vorteil für den OEM ergibt. Dieser Mehrwert kann allerdings zu höheren Gerätekosten führen, wenn nicht an anderer Stelle wie zum Beispiel Bauraum, Leistungsdichte oder Betriebsbereiche Abstriche gemacht werden.

Abb. 21: Vergleich zweier Wandler-Topologien



Quelle : Leopold Kostal

Es ergibt sich also ein Spannungsfeld, da sämtliche Anforderungen unmittelbar miteinander verknüpft sind. Dies muss zwischen den Fahrzeugherstellern und der Zulieferindustrie ständig neu abgestimmt werden, da sich mit sich ändernden Technologien wie z. B. III-V-Halbleiter die Schwerpunkte verschieben werden und sich andere Lösungsräume eröffnen. Bei diesen Diskussionen muss dem Thema „Kosten“ ein hoher Stellenwert eingeräumt werden, da heute die Elektromobilität – sicherlich vorrangig getrieben durch die verfügbaren Batterietechnologien – im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen noch vergleichsweise teurer ist.

Da das Ladegerät direkt mit der Netz-Infrastruktur verbunden ist, bietet es sich natürlich an, über diese Verbindung mittels Power-Line-Communication (PLC) weitere Dienste darzustellen. Speziell die Funktion Plug & Charge stellt dabei für den Endbenutzer einen deutlichen Komfortgewinn dar, da mit dem Stecken des Fahrzeugs an eine Ladesäule direkt die Abrechnungsprozedur gestartet wird, wofür allerdings durch das Fahrzeug eine Autorisierung zu erfolgen hat. Das Fahrzeug fungiert also als Kreditkarte, wobei natürlich alle Sicherheitsfeatures, die heute gelten, auch von dieser im Ladegerät integrierten Funktion zu erfüllen sind. Neben dieser Funktion gehören auch die im asiatischen Raum verwendeten Standards wie z. B. CHAdeMO und GB/T zum Funktionsumfang heutiger Ladegeräte.

13.2 DC/DC-Wandler

Da bei elektrifizierten Fahrzeugen nach wie vor ein 12 V-Bordnetz benötigt wird, bietet es sich natürlich an, diese Versorgung aus der Fahrbatterie abzuleiten. Bei reinen E-Fahrzeugen ist diese ohnehin die einzige Energiequelle, die im Fahrzeug vorhanden ist, und selbst bei Plug-In-Hybriden würden dadurch Generator und 12 V-Batterie zusätzlich zum Starter eingespart werden können.

Die Fahrbatterie arbeitet heute mit Spannungen von 200 V bis zu 500 V, teilweise auch schon mit > 800 V. Das übliche im Fahrzeug gebräuchliche Bordnetz weist dagegen Spannungen von 9 V bis 16 V auf, wobei Leistungen von bis zu 3,5 kW (elektrische Lenkhilfe, Scheiben- und Sitzheizungen, Beleuchtung, usw.) abverlangt werden können.

Diese Transformation wird mit DC/DC-Wandlern erreicht, die Ströme von bis zu 300 A führen können müssen. Wird gänzlich auf eine 12 V-seitige Batterie zur Stützung verzichtet, müssen diese Wandler den im Bordnetz auftretenden Transienten, die bei Schaltheftungen auftreten können, gerecht werden, also eine entsprechend hohe Dynamik abbilden können.

Je nach Anforderungen der Fahrzeughersteller gilt es, die richtige Topologie für den Einsatzfall zu finden, wobei auch hier ähnlich wie beim Ladegerät der Trade-Off zwischen den verschiedenen Anforderungen die Kosten für den Wandler bestimmen.

14 Spannung der Antriebsmaschinen

Zum Antrieb in Hybrid- und Elektrofahrzeugen kommen drei- und mehrphasige Synchron- oder Asynchron- oder Reluktanzmaschinen zum Einsatz, die den automobilen Umgebungsbedingungen angepasst sind (Feuchtigkeit, Temperatur, Bauform, Vibration, Schmutz etc.). Bei allen E-Maschinen sind die folgenden physikalisch gegebenen Gesetzmäßigkeiten zu beachten:

- Die Nenndrehzahl eines Motors bestimmt seine Nennspannung oder umgekehrt, je schneller eine Maschine drehen soll, desto höher muss die Ansteuerspannung des Wechselrichters sein.
- Das Drehmoment eines Motors wird durch die Größe des Stromes bestimmt. Aus diesem Grunde wird das maximale Anfahrmoment durch den maximalen Wechselrichterstrom begrenzt.
- Durch eine Erhöhung der Drehzahl, bei gleichzeitiger Erhöhung der Spannung, kann bei gegebener Bauform die mechanische Leistung einer E-Maschine erhöht werden. Umgekehrt kann bei gleichen Leistungsanforderungen eine kleinere Maschine eingesetzt werden, wenn die Getriebeübersetzung erhöht wird.

Elektrische Maschinen werden durch die Variation der Windungszahlen an die Nenndrehzahl und gleichzeitig an die Nennspannung angepasst, die max. 75 Prozent der (minimalen) Batteriespannung betragen kann. Traktionsmotoren können durch eine geeignete Konstruktion so ausgelegt werden, dass sie durch das Einprägen von Blindstrom im sogenannten Feldschwächebereich betrieben werden. In diesem Bereich verhalten sich E-Maschinen wie ein ideales Getriebe, in dem sie eine konstante Leistung abgeben, bei welcher das Drehmoment mit höherer Drehzahl abnimmt. Bei fremderregten Synchronmotoren kann diese Feldschwächung durch Reduktion des Feldstromes auch ohne zusätzliches Einprägen von Blindstrom erreicht werden.

Durch die Vergrößerung des Feldschwächebereiches wird der Nennpunkt der E-Maschine zu tieferen Drehzahlen hin verschoben. Gleichzeitig wird dadurch die Windungszahl erhöht und der Strombedarf an den Wechselrichter für das benötigte Anfahrmoment reduziert.

Solange die Wickeldrähte nicht zu dünn werden, können durch die Anzahl der Wicklungen E-Maschinen an jede beliebige Versorgungsspannung angepasst werden. Es sind Tendenzen erkennbar, wonach auch bei E-Maschinen die Spannungen erhöht werden, um damit sowohl geringere Querschnitte bei den Anschlüssen als auch höhere Drehzahlen erreichen zu können.

15 Thermisches Management

Da insbesondere bei Hochstromleitungssätzen die thermische Belastung eine entscheidende Einflussgröße ist für die Auslegung, wird mittels geeigneter Modelle die Erwärmung simuliert. Bei der Auslegung von Leitungssätzen werden traditionell Stromerwärmungs- und Deratingkurven als Basis verwendet. Hierbei handelt es sich allerdings um die Erwärmung im statischen Zustand, also bei Dauerbelastung. Da eine Dauerbelastung in Hochstromnetzen in der Regel nicht der Normalfall ist, wird mittels geeigneter Modelle das zeitliche Verhalten der Erwärmung über die Zeit berechnet. Hierzu ist im Rahmen eines ZVEI Arbeitskreises „Thermosimulation“ ein entsprechender technischer Leitfadens erstellt worden. In diesem technischen Leitfaden heißt es zum Hintergrund: „Gerade der HV-Leitungssatz bietet sich für die Thermosimulation an, denn

- ein Querschnittsprung bereits einer einzelnen Leitung hat signifikante Auswirkungen auf Kosten, Gewicht und Bauraum.
- Der HV-Leitungssatz weist eine einfache Struktur auf und besteht zumeist aus Punkt-zu-Punkt-Verbindungen einzelner Leitungen.
- Die elektrischen Ströme auf den Leitungen sind gut kalkulierbar, da sie jeweils nur durch eine oder sehr wenige Komponenten definiert werden.

Zur Auslegung eines Leitungssatzes kann eine Ungenauigkeit der Simulation in der Größenordnung weniger Kelvin ohne weiteres akzeptiert werden. Die Verwendung der hochkomplexen und damit rechenzeitintensiven FEM-Modelle ist deshalb nicht notwendig. Durch die Berücksichtigung der Rotationsymmetrie ist eine weitere, wesentliche Vereinfachung der Simulationsmodelle möglich.

Die Simulationsmethode der „Thermischen Netze“, auf der alle weiteren Darstellungen beruhen, hat sich für HV-Leitungssätze als ausgesprochen effizient und erstaunlich präzise erwiesen. Die üblichen Simulationszeiten für das dynamische Verhalten eines Leitungsstrangs liegen unter einer Minute. Vergleichsmessungen belegen die Genauigkeit im Bereich der Messtoleranz.“

Der Leitfaden enthält einen Katalog der Simulationsbausteine mit ihren „kompakten“ Parametern, und auch Anleitungen, wie diese kompakten Parameter aus den „Basisparametern“, also den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und Bauteile ermittelt werden können.

16 Regularien, Normung & Standardisierung

Eine Vielzahl von Normen ist für die Elektromobilität von Relevanz. Dazu zählen solche Normen, die direkt für elektromobile Anwendungen erstellt worden sind. Beispielhaft seien die Normen für die Ladeinfrastruktur und für elektrische Leitungen in Kraftfahrzeugen für Spannungen > 60 Volt genannt. Daneben existieren viele Normen der Elektrotechnik, die zwar nicht speziell für die Elektromobilität erstellt wurden, die aber aufgrund ihres allgemeinen Charakters auch für die Elektromobilität von Bedeutung sind. Hierzu zählen zum Beispiel die Sicherheitsgrund- und gruppennormen und Normen, die die Installation und Geräte betreffen.

Im Rahmen der Aktivitäten der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) wurden diese Normen vom DKE als Anhang der dort erarbeiteten Normungroadmap zusammengestellt. Der zuständige Technische Arbeitskreis Normung und Standardisierung im ZVEI pflegt und erweitert diese Auflistung mit Informationen, die für die Arbeit im Bereich Elektromobilität von Interesse sind. Zu diesen Zusatzinformationen zählt eine genauere Beschreibung, was die jeweilige Norm beinhaltet und wie der Bearbeitungsstand ist.

17 Sicherheit: Gefährdungspotentiale im Umgang mit HV-Spannungen

Die Vermeidung der Gefährdung von Personen bei der Entwicklung, Herstellung, Wartung und beim Gebrauch von Produkten für den HV-Spannungsbereich hat höchste Priorität.

Die Gefährdungspotentiale sind:

- Elektrische Energie
- Störlichtbögen
- Körperdurchströmung (elektrischer Schlag)
- Elektromagnetische Felder z. B. Beeinflussung Herzschrittmacher
- Wechselwirkung zwischen elektrischer Energie und anderen Medien

17.1 Wirkung des elektrischen Stroms auf den Körper

In Abhängigkeit der Einwirkdauer und der Stromstärke kann der elektrische Strom vielfache Reaktionen im menschlichen Körper auslösen.

Physiologische Wirkung

Die Beeinflussung des Nervenleitsystems führt über das Auslösen von Krämpfen, die u.U. das Loslassen des spannungsführenden Teils verhindern, zum Herzkammerflimmern bis hin zum Herzstillstand.

Abb. 22: Stromfluss durch Körper



Quelle : Kostal Kontakt Systeme

Chemische Wirkung

Der Strom kann die elektrolytische Zersetzung von Zellen bzw. Zellbestandteilen verursachen, die zu einer Vergiftung des Körpers führen können. Hierbei können die Symptome zeitverzögert wahrgenommen werden, deshalb muss auch bei einem scheinbar leichten Unfall mit HV-Spannung ein Arzt aufgesucht werden.

Die oben genannten Gefährdungspotentiale der HV-Spannung und die daraus möglichen Schäden für Personen und Tiere erfordern zwingend Schutzmaßnahmen.

17.2 Elektrische Sicherheit im Unternehmen

Die dargestellten Gefährdungspotentiale erfordern besondere Vorsichtsmaßnahmen in den Industrie- und Handwerksunternehmen, die im Bereich der Elektromobilität tätig sind, insbesondere im Hinblick auf den Aspekt der Arbeitssicherheit und des Arbeitsschutzes.

Chemische Wirkung

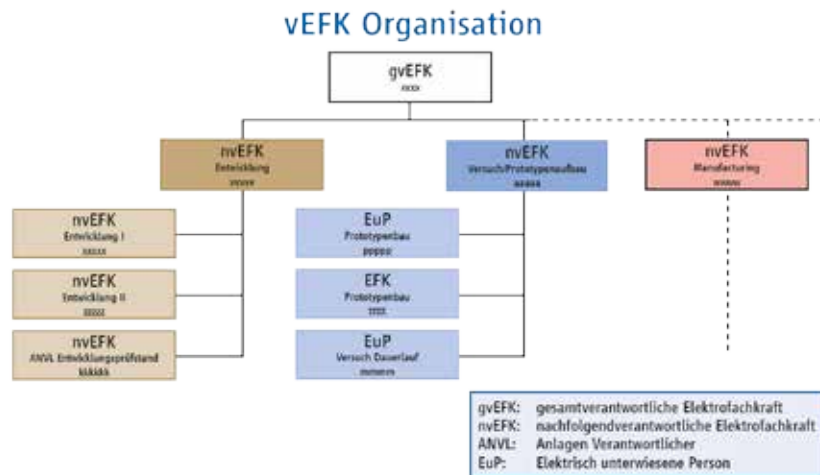
Der Strom kann die elektrolytische Zersetzung von Zellen bzw. Zellbestandteilen verursachen, die zu einer Vergiftung des Körpers führen können. Hierbei können die Symptome zeitverzögert wahrgenommen werden, deshalb muss auch bei einem scheinbar leichten Unfall mit HV-Spannung ein Arzt aufgesucht werden.

Die oben genannten Gefährdungspotentiale der HV-Spannung und die daraus möglichen Schäden für Personen und Tiere erfordern zwingend Schutzmaßnahmen.

17.2 Elektrische Sicherheit im Unternehmen

Die dargestellten Gefährdungspotentiale erfordern besondere Vorsichtsmaßnahmen in den Industrie- und Handwerksunternehmen, die im Bereich der Elektromobilität tätig sind, insbesondere im Hinblick auf den Aspekt der Arbeitssicherheit und des Arbeitsschutzes.

Abb. 23: Organisation Elektrofachkraft, Struktur der Kompetenz



Quelle : ZVEI

Zwar sind die DIN VDE 1000-100 und die DIN VDE 105-100 keine Rechtsnormen, sie haben jedoch einen gleichsam zwingenden Charakter, da es sich um anerkannte Regeln der Technik handelt, bei deren Befolgung die Verpflichtungen des Arbeitgebers zum Arbeits- und Gesundheitsschutz erfüllt sind, was insoweit Rechtssicherheit schafft.

Für alle Bereiche im HV-Umfeld, z. B. Labor, Fertigung, Werkstatt, müssen Gefährdungsbeurteilungen für die Arbeitsplätze und die Tätigkeiten erstellt werden. Darauf aufbauend sind Arbeits- und Betriebsanweisungen zu erstellen. Oft wird eine Anpassung, eine Umrüstung oder Erweiterung von Labor-, Werkstatt- und Arbeitsplätzen zur Erreichung der erforderlichen elektrischen Sicherheit unabdingbar sein. Besondere Kennzeichnung von HV-Arbeitsbereichen und Zutrittsbeschränkungen für nicht eingewiesene Personen sind weitere mögliche Maßnahmen zur Erhöhung der elektrischen Sicherheit. Periodische Schulungen der Mitarbeiter vervollständigen die Aktivitäten zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit.

17.3 Schutzkonzept

Bei Geräten in der Schutzklasse B ($60 \text{ VDC} < \text{Spannung} < 1.500 \text{ VDC}$) muss eine doppelte Schutzmaßnahme (Schutz gegen direktes und indirektes Berühren) angewandt werden (ISO 6469-3). Ein Konzept umfasst den Basisschutz gegen direktes Berühren und den Potentialausgleich als Schutz gegen indirektes Berühren. Alternativ hierzu können doppelte oder verstärkte Isolationen zur Anwendung kommen.

17.4 Schutzmaßnahmen

Hierzu zählen konstruktive Maßnahmen,

- die zu einem Fingerschutz, IP2xB, oder zu Schutz gegen Zugang mit einem Werkzeug, IP3xD, bei unter Spannung stehenden Komponenten notwendig sind,
- den Zugang zu den spannungsführenden Teilen erschweren,
- die Werkzeuge zum Öffnen von Verriegelung und Gehäusen erfordern.

Integrale Bestandteile der Auslegung des Berührungsschutzes von HV-Geräten sind

- Die Wahl der Isolation aus festen Isolierstoffen mit Isolationswiderständen $> 100 \Omega/\text{VDC}$ bzw. $> 500 \Omega/\text{VAC}$,
- der Abstand von spannungsführenden Teilen zu metallischen Gehäusen,
- die korrekte Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken.

17.4.1 Der Potentialausgleich

Der Potentialausgleich als Schutz gegen indirektes Berühren erfordert eine niederohmige Verbindung von HV-Geräten mit metallischen Gehäusen im Fahrzeug. Der Summenwiderstand der Verbindungen muss $< 100 \text{ m}\Omega$ sein.

Ein weiterer Baustein zur Komplettierung der Schutzmaßnahmen ist die Potentialtrennung der Gerätebereiche mit HV und mit Kleinspannung. Hierbei muss das potentialbezugsfreie HV-Netz durch galvanische Trennung von den Kleinspannungsnetzen separiert werden. Die galvanische Trennung wird durch Verwendung geeigneter Bauteile zur Signal-, Daten- und Energieübertragung erreicht. Die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen wird durch die Messung des Isolationswiderstandes und durch Anlegen der Prüfspannung durchgeführt.

Dies ist für alle HV-Komponenten notwendig!

Die normgerechte Kennzeichnung HV-führender Geräte, gelbes Dreieck mit Blitz, muss erfolgen.

17.4.2 Schutzfunktionen

Der Überstromschutz muss in den HV-Geräten gewährleistet sein. Energiespeicher und Leistungselektronik müssen mögliche Kurzschlussströme sicher abschalten. Die Berührung von Spannungen oberhalb 60 VDC müssen beim Öffnen elektrischer Kontaktierungen sicher vermieden werden.

Komponenten, die vom HV-Bordnetz getrennt werden, müssen durch passive Entladung die in der Komponente gespeicherte Energie abbauen und den Spannungspegel auf weniger als 60 VDC in einer vom Automobilhersteller spezifizierten Zeit reduzieren.

HV-Komponenten müssen durch Auslegung des Systems entsprechend DIN 6469 folgende Spannungsfestigkeit aufweisen – zurzeit gängige Praxis:

- galvanisch getrennt:
Prüfspannung = $2 \cdot U_{Neff} + 1.000 \text{ Veff}$
- galvanisch verbunden:
Prüfspannung = max. Systemspannung

Ausnahmen für Wechselrichter sind in Diskussion.

17.4.3 Optionale Schutzfunktionen

Eine optionale Schutzfunktion, die nicht je HV-Komponente angewandt wird, sondern im HV-Netzverbund betrachtet wird, ist die Isolationsüberwachung. Hierbei wird der Isolationswiderstand der HV-Netze, AC- und DC- System, gegenüber Fahrzeugmaße (Potentialausgleich) überwacht. Bei Isolationsverletzung wird in einem mehrstufigen Warnsystem der Fahrzeugnutzer auf den Fehler aufmerksam gemacht bzw. zum Service aufgefordert.

Die Erkennung eines geöffneten HV-Kreises ist eine weitere optional angewandte Schutzfunktion. Der sogenannte HV-Interlock verhindert das Öffnen eines unter Last stehenden HV-Kreises, indem über einen voreilenden Kleinspannungssignal-Kontakt im HV-Stecker einem zentralen Steuergerät (Batteriesteuergerät) die Öffnung des HV-Kreises signalisiert. Im zentralen Steuergerät wird die Abschaltung des HV-Netzes vorgenommen und die Energiezufuhr vor dem Öffnen der HV-Kontakte gestoppt.

18 Lebensdauer

Im Vergleich zu den im konventionellen Fahrzeug verwendeten Komponenten bringt die Elektromobilität für die Leistungselektronik auch Änderungen mit sich, die im Zusammenhang mit Lebensdauerbetrachtungen stehen. Diese Änderungen ergeben sich zum einen aus der erhöhten Betriebszeit einzelner Systeme und zum anderen durch Belastungsunterschiede bei den zu verwendenden HV-Komponenten.

Im Nutzfahrzeug ergeben sich Betriebszeiten von mindestens 50.000 Stunden. Damit liegen die Anforderungen für den Antriebsstrang inklusive Batterie bei LKWs und Bussen deutlich höher als im Pkz, während die Anforderungen an das Batteriemangement und an Ladesystem in etwa gleichbleiben. Es sind aber zusätzlich die sehr unterschiedliche Lastprofile zu berücksichtigen, welche im Gegensatz zum Pkz, eine deutlich

Tab. 3: Lebensdauer-Randbedingungen

Lebensdauer-Randbedingungen				
ZVEI TF LE, 15.05.2013				
	Stationär	Fahrzeug		
		Nutzfahrzeug/Bus	Pkw	
Lebensdauer Kalendarisch	10	15	15	Jahre
Betriebsstunden	30.000	60.000	8.000	h
T_{min}	-40	-25	-25	°C
T_{max}	70	85	85 – 120	°C
ΔT	110	110	110 – 145	K
Vibration	keine	2-10g, teilw. bis 30	2-10g, teilw. bis 30	

Quelle : ZVEI

Hinsichtlich Betriebszeit ergeben sich die größten Unterschiede für das Ladesystem und das Batteriemangement-System.

Während im konventionellen Fahrzeug mit ca. 8.000 Betriebsstunden zu rechnen ist, sind die On-Board Ladesysteme immer dann aktiv, wenn das Fahrzeug „am Stecker hängt“. Hierfür werden derzeit ca. 30.000 Betriebsstunden angenommen. Als Stand-by Zeit sind für die Ladeinheit noch weitere 60.000 Stunden hinzu zu rechnen.

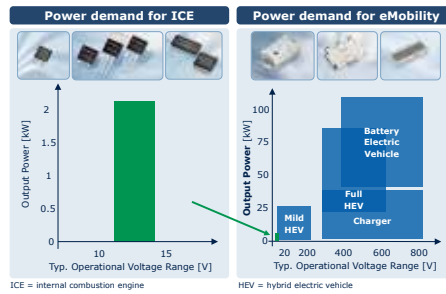
Das Batteriemangement-System (BMS) muss permanent den Zustand der Batterie überwachen. Es ist somit für die Überwachung der Batterie von einer Betriebszeit von 80.000 Stunden auszugehen. Im Gegensatz zur Leistungselektronik, die im elektrischen Antrieb verwendet wird, kann für die im BMS verwendete Leistungselektronik von einem reduzierten Betriebstemperaturbereich ausgegangen werden. Diesem System kommt die Tatsache entgegen, dass die Batterie aufgrund ihrer elektrochemischen Eigenschaften temperiert und damit der Betriebstemperaturbereich des Gesamtsystems Batterie und BMS deutlich eingeschränkt werden muss.

höhere Dauerleistung und deutlich längere Zeiten mit maximaler Leistung aufweisen.

Die grundlegenden Unterschiede in der Belastung der Leistungselektronik für die Elektromobilität gegenüber einer solchen im konventionellen Fahrzeug ergeben sich aus folgender Betrachtung:

Im konventionellen Fahrzeug wird Kraftstoff getankt, im Motor zusammen mit Sauerstoff verbrannt und in mechanische bzw. thermische Energie gewandelt. Es ist ein chemisch-thermisch-mechanischer Energiefluss. Hierbei ist die Elektronik lediglich Helfer, um die Betriebszustände möglichst optimal zu gestalten. Im elektrifizierten Fahrzeug kommt die elektrische Energie aus der Batterie und wird im Elektromotor in mechanische Energie gewandelt. Es ist ein elektrisch-mechanischer Energiefluss. Die gesamte Energiemenge „fließt“ hierbei über elektrische „Stellglieder“. Die hierfür notwendige Leistungselektronik ist damit in einer ganz anderen Dimension angesiedelt.

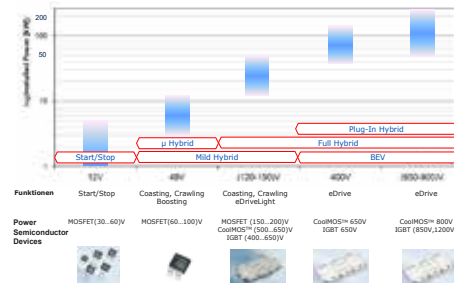
Abb. 24: Vergleich der Leistungsklassen der Leistungselektronik; konventionelles und elektrifiziertes Fahrzeug



Quelle : Infineon Technologies

Lebensdauerbetrachtungen müssen daher die für das Kfz neuen, in dieser Dimension aber notwendigen Leistungsbaulemente und deren spezifische Aufbau- und Verbindungstechnik (z. B. thermische Anforderung gegenüber kräftigen Vibrationen) berücksichtigen.

Abb. 25: Leistungsbaulemente/ Module und Leistungsklassen der Leistungselektronik



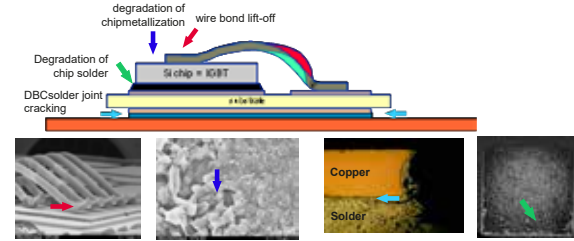
Quelle : Infineon Technologies

Neben den Ausfällen, die sich im Zusammenhang mit der Spannung (Überschläge durch zu klein gewählte Luft- und Kriechstrecken) und dem Strom ergeben, sind insbesondere spezifische Ausfallmechanismen durch thermische Beanspruchung wie im Abschnitt Thermal Management beschrieben zu betrachten.

Bei den Ausfallmechanismen in den Leistungshalbleitern kommt, wie bereits angedeutet, der Betrachtung der Materialverbände aus verschiedenen Metallen, Metalllegierungen, Keramik zur Isolation, Silizium als eigentlichem Leistungsschalter usw. eine besondere Bedeutung zu. Denkt man an die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten wird schnell klar, dass es bei Tempera-

Abb. 26: Ausfallursachen bei einem Leistungsmodul

Typical wear out mechanisms in power modules



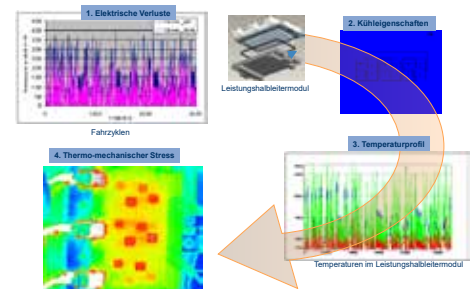
Quelle : Infineon Technologies

turwechseln, die sich aus der Verlustleistung beim Schalten der Halbleiterbauelemente und den elektrischen Widerständen der Materialien ergeben, zu einem erheblichen thermomechanischen Stress des Materialverbundes kommt.

Ob und in welchem Ausmaß es dabei zu Ausfällen kommt, hängt also wesentlich vom thermomechanischen Stress ab, der auf die Bauelemente und die Aufbau- und Verbindungstechnik ausgeübt wird.

Hierbei werden durch Maximaltemperatur und Anzahl der Belastungszyklen die Grenzen gesetzt. Diese wiederum sind vom Fahrprofil und den Kühleigenschaften des Systems abhängig.

Abb. 27: Vom Fahrprofil zum thermo-mechanischen Stress in der Leistungselektronik



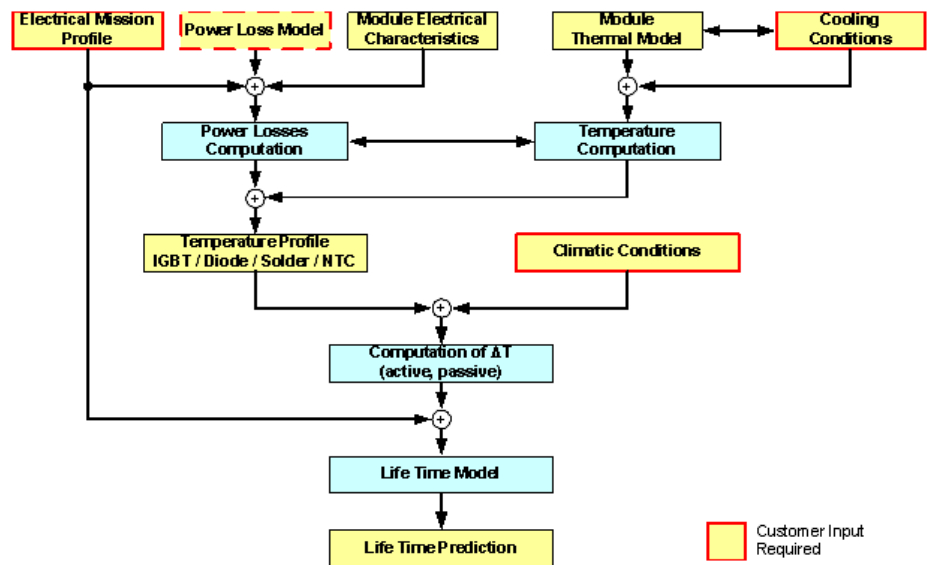
Quelle : Infineon Technologies

Durch die geringen Bauräume im Fahrzeug werden die Elektroniken bei verhältnismäßig hohen Temperaturen betrieben, was vor allem für die Lebensdauer der großen Elektrolytkondensatoren in den Laderegeln eine hohe Herausforderung ist. Zusätzlich kommt durch die starken Vibrationen eine weitere hohe Belastung auf die großen Kondensatoren zu, die durch Befestigung der Kondensatorwickel in ihren Gehäusen und der Befestigung an der Platine gelöst werden müssen, da ein Vergießen oder Verkleben der Kondensatoren nach dem Einbau aus Kostengründen vermieden werden soll.

Um zu einer Lebensdauer-Aussage zu kommen, ist also die Kenntnis der Ausfallmechanismen, des Anforderungsprofils und der Auslegung des Systems wesentlich. Das sind keine neuen Erkenntnisse. Die Neuartigkeit liegt vielmehr darin, dass die Kombination „Leistungs-Bauelement im Auto“ eine neue ist. Zwar werden die Komponenten beispielsweise für elektrische Antriebe in Zügen oder großen Fertigungsstraßen bereits eingesetzt, die aus diesem Einsatz abgeleiteten Anforderungsprofile sind aber auf den Kfz-Einsatz nur bedingt übertragbar. Auch stellt das Kfz andere Anforderungen an Stückzahl und Kosten, die wiederum Einfluss auf den Systemaufbau haben.

Die komplexen Wechselwirkungen aus Lastprofil, Systemaufbau und Ausfallmechanismen führen dazu, dass eine allgemeine Aussage zur Lebensdauer nur eingeschränkt möglich ist. Solche Aussagen sind jedoch bereits im Entwicklungsprozess wichtig. Somit wird die Aufgabe „Lebensdauer-Vorhersage“ auch unter Zuhilfenahme entsprechender Modelle gelöst, die fahrzeugmodellspezifische Eingangsgrößen berücksichtigen. Nur so lassen sich zuverlässige Aussagen über die Lebensdauer herleiten.

Abb. 28; Modell zur Lebensdauervorhersage



Quelle : Infineon Technologies

19 Offene Fragen

19.1 Weitere Optimierungsgrößen

Aus der Sicht der in Fahrzeugen verwendeten Spannungen ist eine formelle Standardisierung vorerst nicht zu erwarten. Das Technologieumfeld der Elektromobilität ist noch starken Veränderungen unterworfen und Optimierungen sowie Erprobungen neuer Ideen sind unabdingbar. Ein Trend lässt sich hier bereits anmerken. Bisher sind elektrische Komponenten nicht auf minimales Bauvolumen und Gewicht optimiert. Im Fahrzeug sind diese Größen aber unabdingbar. Eine funktionale Integration wird voranschreiten und somit die Variantenvielfalt im Systemumfeld helfen zu reduzieren, was im Ergebnis eine Standardisierung ermöglichen könnte. In den nächsten Jahren wird ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt auf die Optimierung des elektrischen Energiesystems gelegt werden müssen, um international wettbewerbsfähig zu bleiben.

20 Zukunftsausblick und Fazit

Mobilität wird in der Zukunft durch elektrische Antriebskonzepte bestimmt werden, sei es als Hybride in allen Varianten, durch reine E-Fahrzeuge oder durch Fahrzeuge mit Brennstoffzellen. Damit verbunden werden jenseits der heutigen 12/24 Volt Spannungen neue Spannungsebenen unsere Fahrzeuge erobern. Die elektrische Leistungsübertragung spielt für das Gesamtsystem in Hybrid-, Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen eine wichtige Rolle. Abhängig vom Systemaufbau werden an alle HV-Komponenten unterschiedlichste Anforderungen gestellt.

Die Beherrschbarkeit dieser Neuerungen ist heute Schwerpunktthema in allen beteiligten Fahrzeugentwicklungsbereichen. Realistisch betrachtet sind alle dafür notwendigen Technologien bereits vorhanden – es gilt jetzt, diese in die automobilen Umgebung zuverlässig und sicher zu implementieren. Dies ist ein evolutionärer Prozess, der mit jeder Applikation Verbesserung aufzeigen wird und innerhalb der Komponenten ebenso die dazu notwendige Standardisierung einbringen wird – und damit verbunden ebenso die Produktkosten verringern.

Trotzdem wird sich das automobilen Umfeld an die neuen Bedingungen anpassen müssen, sei es in der Entwicklung und Herstellung, aber auch im Betrieb und im Service. Hier ist sicherlich noch einiges zu leisten, was den Umgang mit Elektroantrieben und deren Fragestellungen betrifft. Und es gilt, die entsprechende Expertise bereitzustellen und damit verbunden auch die Ansprüche an die Ausbildung unserer Experten. Die Technischen Arbeitskreise des ZVEI-Kompetenzzentrums Elektromobilität werden diesen Prozess aktiv begleiten.

Darüber hinaus wird sich auch die Automobilen Umwelt der stationären Energiebereitstellungsindustrie nähern, denn Elektromobilität setzt die Erzeugung und zur Verfügungstellung von elektrischer Energie voraus – sei es innerhalb der notwendigen Infrastruktur (Grids) oder bidirektionaler Speicherkonzepte (Supergrids). Hier ist sicherlich noch Entwicklungsarbeit notwendig. Die Zukunft der Elektromobilität wird spannend bleiben und unsere Ingenieure und Techniker noch lange Zeit beschäftigen, möglicherweise mit dem Ziel, in ferner Zukunft ganz auf fossile Energieträger verzichten zu können.

21 Literaturhinweise

- Forschungsvorhaben „ProPower“ – Kompakte Elektronikmodule mit hoher Leistung für Elektromobilität, gefördert durch BMBF, Ref. 523
- Novel silver contact material for applications on DCB, Yvonne Löwer, Thomas Krebs, Susanne Duch, Sebastian Fritzsche, Wolfgang Schmitt, Muriel Thomas, PCIM 2012
- Kontaktierung mit Sintertechnologien, Wolfgang Schmitt, Sebastian Fritzsche, 2013
- 1. IEC 60529 (DIN 40050-9): Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code), Oktober 1991
- 2. IEC 60664-1: Isolationskoordinaten für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen, Januar 2008
- 3. ISO 6469-3: Electrically propelled road vehicles – Safety specification – Part 3: Protection of persons against electric shock, November 2010
- 4. IEC 62196-1: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen Teil 1: Generelle Anforderungen, Oktober 2011
- 5. IEC 62196-2: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen Teil 2: Anforderung an und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsen vorrichtungen, Mai 2010
- 6. http://www.iso.org/iso/mou_ev.pdf

22 Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
BMS	Batteriemanagementsystem
CHAdeMO	In Japan entwickelte markenübergreifende elektrische Schnittstelle eines Batteriemanagementsystems für elektroautos (charge de move)
DC	Gleichstrom
E / E	Elektrik / Elektronik
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EV / BEV	Electric Vehicle / reines Batteriefahrzeug
HV	Hochvolt
HVIL	High Voltage Interlock Loop
IGBT	insulated-gate bipolar transistor, Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode
IT	Isolated Terra, isolierte Erdung
IEC	International Electrotechnical Commission
IPX2B	Electric Shock Protection Standard
ISO	International Organisation for Standardisation
Kfz	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
Lkw	Lastkraftwagen
LV	Low Voltage
MOSFET	metal oxide semiconductor field-effekt transistor, Metall-Oxid-Halbleiter-Feldefektttransistor
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
Pkw	Personenkraftwagen
Nkw	Nutzkraftwagen
SiC-Deode	Schottky-Deode, hat keinen p-n-Übergang (Halbleiter-Halbleiter-Übergang) sondern einen (sperrenden) Metall-Halbleiter-Übergang
vEFK	verantwortliche Elektrofachkraft
Wh/kg	Wattstunden pro kg Masse, Energieinhalt pro Gewicht
Wh/l	Wattstunden pro Volumen, Energievolumen, Energieinhalt pro Volumen



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