

Spannungsklassen in der Elektromobilität





Impressum

Spannungsklassen in der Elektromobilität

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Kompetenzzentrum Elektromobilität

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

Redaktion:

Layla Dorn

Autoren:

ZVEI-Task Force Spannungsklassen:

Bertrandt

Delphi Deutschland

Heraeus Materials Technology

Infineon Technologies

Leopold Kostal

Lenze Schmidhauser

Leoni Kabel

Robert Bosch

Schweizer Electronic

Tyco Electronics AMP

Webasto SE

ZF Friedrichshafen

Dezember 2013

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 die 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 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 Gesamtsicht zu vertiefen.

Inhalt

1 Adressatenkreis und Zielsetzung	3
2 Editorial	6
3 Technische Einleitung	8
4 Neue Lowvoltage-Spannungsebene 48 V	11
5 Hochvolt	11
5.1 Namensgebung ‚Hochvolt‘	12
6 Anbindung an die Ladeinfrastruktur	13
7 Zusammenspiel verschiedener Spannungsebenen	14
8 Batterien	16
9 Ladespannungen	18
9.1 AC-Ladespannungen	18
9.2 Ladespannung DC-Schnellladen	18
10 Einfluss auf die Kosten der Komponenten	20
10.1 Leistungssteigerung mittels Spannungserhöhung	20
11 Leistungselektronik	21
12 Schütze	22
13 Energieverteilung	22
14 HV-Steckverbinder	24
14.1 Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung	26
15 Laderegler und DC/DC-Wandler	26
16 Spannung der Antriebsmaschinen	27
17 Thermisches Management	28

18 Regularien, Normungen und Standardisierung	29
19 Sicherheit: Gefährdungspotentiale im Umgang mit HV-Spannungen	29
19.1 Wirkung des elektrischen Stroms auf den Körper	29
19.2 Elektrische Sicherheit im Unternehmen	30
19.3 Schutzkonzept	31
19.4 Schutzmaßnahmen	31
19.4.1 Der Potentialausgleich	32
19.4.2 Schutzfunktionen	32
19.4.3 Optionale Schutzfunktionen	33
20 Lebensdauer	33
21 Offene Fragen	37
21.1 Weitere Optimierungsgrößen	37
22 Ausblick und Fazit	37
23 Anhang	38
23.1 Halbleitermaterialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik	38
23.1.1 Neue Lotlegierungen	38
23.1.2 Diffusionslöten	39
23.1.3 Silbersintern	40
23.1.4 Bonddrähte und -bändchen	41
23.1.5 Zugfestigkeit	41
23.1.6 Endoberflächen der Chips, Substrate, Frames	41
24 Abkürzungsverzeichnis	42
25 Literaturhinweise	43

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 dem Umweltschutz genüge getan werden kann, sondern wesentlich erhöhte Fahrdynamik und Fahrerfreude damit einhergehen. Das lässt erwarten, dass zukünftig die Elektrifizierung des Antriebsstrangs weiter zunehmen wird und bei einer wachsenden Käuferschicht Interesse finden wird.

Das wiedererwachte 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. Das war der noch fehlende Impuls, der zu den heutigen E-Mobilitätsentwicklungen führte. Jeder Marketingexperte weiß, dass mit entsprechendem Spaß beim Fahren mehr Käufer erreicht werden. Somit stehen auch eventuelle Mehrkosten Kaufargumenten nicht entgegen.

Zur Einhaltung der CO₂-Emissionswerte des Kyoto-Protokolls postuliert die EU-Kommission für die Zeit ab 2015 CO₂-Limits, die mit der traditionellen Verbrenner-Technologie kaum einzuhalten sind. Zudem drohen Strafzahlun-

gen, wenn diese Grenzwerte im Flottenmittelwert überschritten werden. Durch den Einsatz aktueller Hybridtechnik kann dieser Gefahr begegnet werden, da die CO₂-Emissionen bezogen auf den europäischen Drittelsmix im Mittelwert 10–20 Prozent reduziert werden können. Darüber hinaus strebt die E-Kommission für die Zukunft CO₂-freie Innenstädte an. Das erfordert den Einsatz von Fahrzeugen, die in der Lage sind, zumindest kürzere Distanzen ausschließlich elektrisch zurückzulegen. Soviel zur Wiedergeburt des Elektrofahrzeugs!

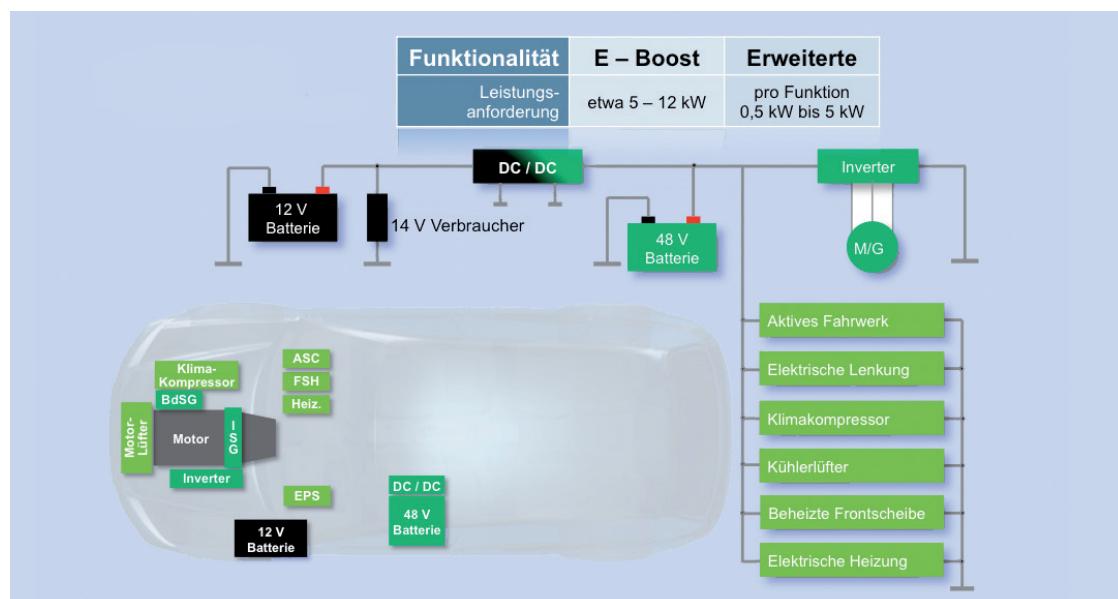
Bis in jüngster Zeit waren Hybridantriebe meist asiatischer Provenienz. Marktgerechter Wettbewerb führte zum Einzug dieser Technik in europäische und außereuropäische Fahrzeuge. Der damit einhergehende Entwicklungsboom traf auf eine Verfügbarkeit von Hochvolt-Komponenten, die zwar in der Militär- und 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 geeigneter Komponenten ersetzt, die erst einmal spezifiziert, entwickelt und hergestellt werden mussten.

Heute steht uns eine Vielzahl von Hochvolt-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 neben den fahrdynamischen Vorteilen auch preislich an Attraktivität gewinnen wird.

Angesichts der Evolution der Hybridmechanisierungen bei PKW 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 (siehe Abb. 1–3).

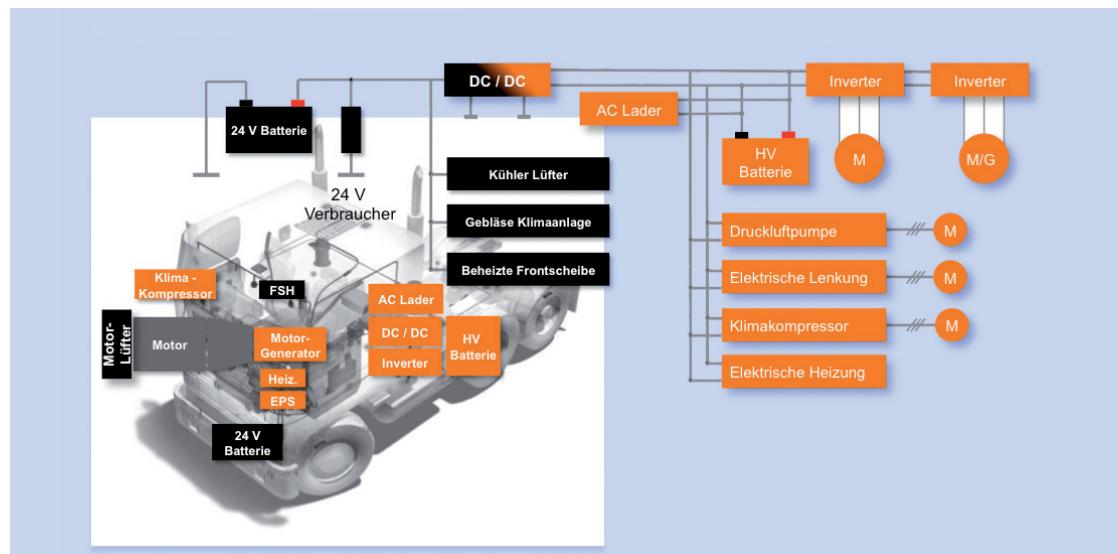
- Traditionelle 12/24 Volt-Ebene für alle gängigen Fahrzeug- und Komfortfunktionen
- 48 Volt-Ebene für die Verbraucher ein kW bis fünf kW und Anwendung in Mild-Hybriden für Boost Funktion und Rekuperation bis maximal 12 kW (grün)
- Hochvolt-Ebene für Hybrid- und Elektrofahrzeuge für Boost Funktion, Rekuperation und elektrisches Fahren größer als 12 kW (rot/orange)

Abb. 1: 14 V – 18 V Basis-Architektur



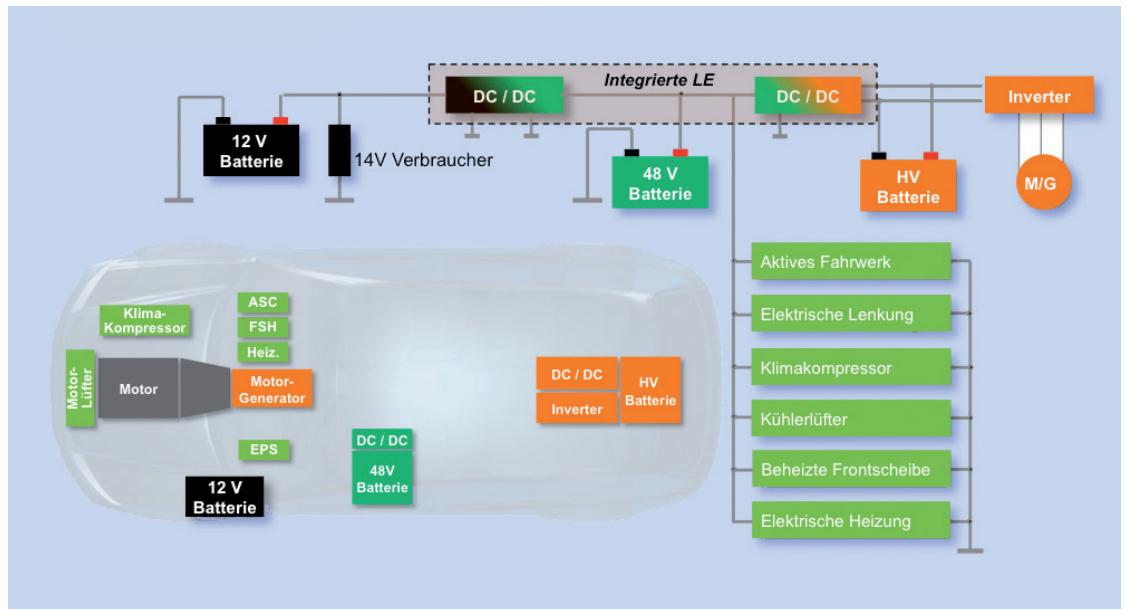
Quelle: Delphi Deutschland

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



Quelle: Delphi Deutschland

Abb. 3: 14 V – 48 V – HV – E/E-System, Hybrid-Fahrzeug



Quelle: Delphi Deutschland

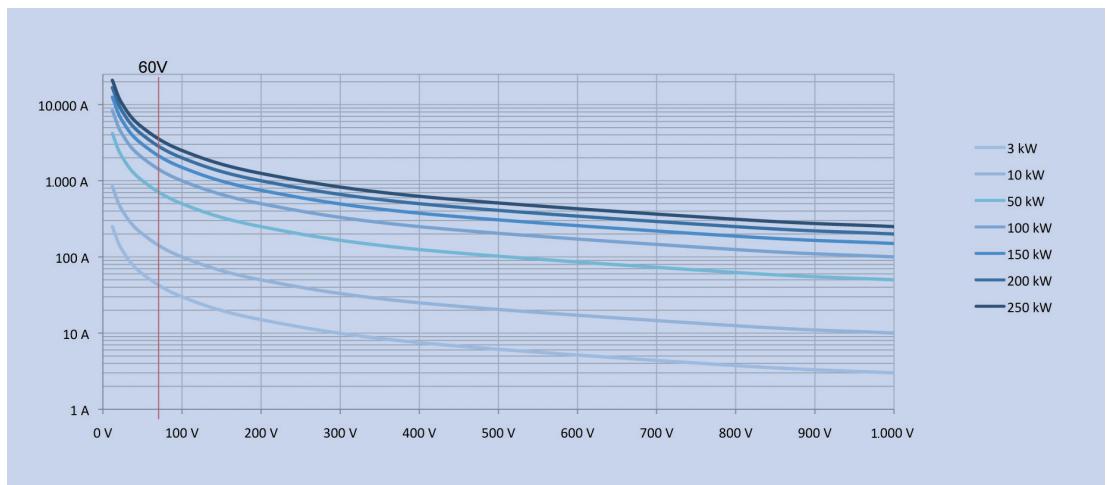
Die nachfolgenden Abhandlungen konzentrieren sich auf den aktuellen Stand der verschiedenen Spannungsebenen und deren Einsatz in PKW und NKW. Näher untersucht werden zu dem die technischen Auswirkungen auf die in Hybridfahrzeugen eingesetzten Komponenten. Nicht betrachtet werden die Spannungsebenen innerhalb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

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 als 12/24 V Industrie- und Haushaltssapplikationen vorbehalten, so erfordert die elektrische Antriebsleistung in PKW und NKW bis zu einigen hundert Volt höheren Spannungen.

Abb. 4: Motor- und Batteriestrom – Systemspannung

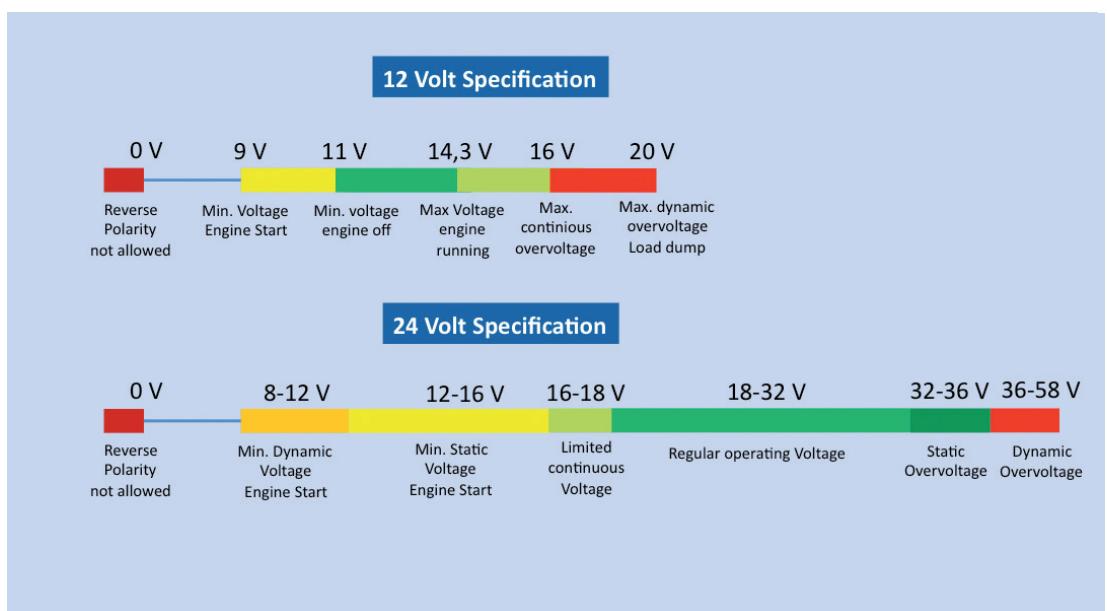


Quelle: Lenze Schmidhauser

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

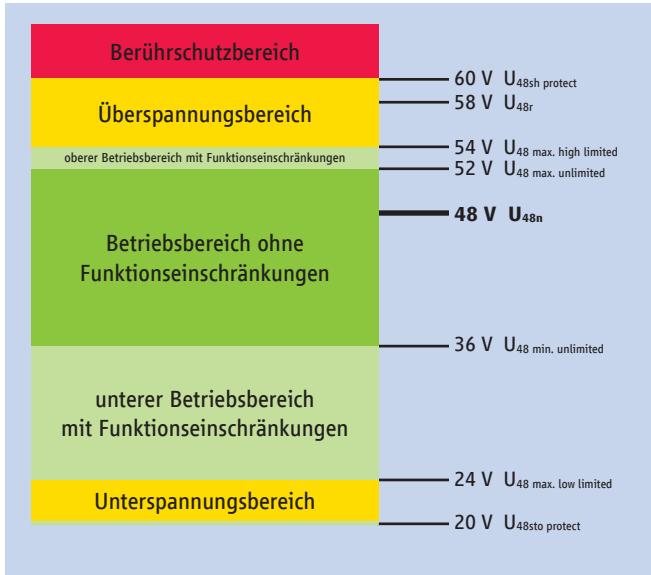
Während die gängigen Spannungsebenen weitgehend durch den VDE standardisiert sind, fehlt zum jetzigen Zeitpunkt ein allgemein gültiger Standard für die Spannungsbereiche größer als 60 V DC im Automobil.

Abb. 5: Spannungen im 12/24 Volt-Bordnetz



Quelle: ZVEI

Abb. 6: Spannungen im 48 Volt-Bordnetz



Quelle: Delphi Deutschland

weil dadurch die Zahl der Zellverbindungen reduziert wird und der Aufwand für das Batteriemanagement 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 man sich in der Automobilentwicklung basierend auf Erfahrungswerten auf einheitliche Strukturen und Komponenten einigen wird.

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, was zu einer gewissen Individualität und Vielfalt führt.

Die elektrischen Architekturen und deren physikalische Realisierung sind ebenfalls 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,

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 Grenzen halten.

Zu übertragende elektrische Leistungen in dieser Größenordnung bei stationären oder mobilen Anwendungen wie Bahnen oder Gabelstaplern wurden bisher von elektrotechnischem Fachpersonal bedient und gewartet. Bei der Nutzung von PKW wird diese Technik aber auch Laien 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. Selbst im Falle eines Unfalls muss diese Sicherheit gegeben sein. Auf diesen Punkt wird an anderer Stelle noch eingegangen.

4 Neue Lowvoltage-Spannungsebene 48 V

Bereits heute ist absehbar, dass sich neben den beiden Ebenen 12/24 V bis Hochvolt, eine dritte Ebene 48 V etablieren wird, die u. a. dafür vorgesehen ist, elektrische Aggregate größer als 3 kW Leistung zu bedienen. 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.

Technisch gesehen spiegelt die 48 Volt-Spannungsebene im Wesentlichen wider, was um die Jahrtausendwende im Hinblick auf die 42 Volt-Standardisierung erarbeitet wurde. Das ist aus heutiger Sicht zu begrüßen, da die damaligen Erkenntnisse zum großen Teil

übernommen werden können und man sich weiterhin unterhalb der VDE-Kleinspannungsgrenze (kleiner als 30 V AC, kleiner als 60 V DC) bewegt, was aufwendige Personenschutzmaßnahmen wie Berührschutz, Potentialausgleich und Isolationsüberwachung obsolet erscheinen lassen. Trotzdem wird im Bereich der Steckverbinder einen Überwachungskontakt vorgesehen, der das sogenannte ‚Hot Plugging‘ verhindern soll.

Abb. 7: Elektrischer Heizer



Quelle: Webasto Thermo & Comfort

5 Hochvolt

Elektrische Antriebsstrangleistungen größer als 12 kW sind nun der Hochvolt-Spannungsebene vorbehalten, wobei sich die Höhe der Spannung aus den zu übertragenden Strömen von ca. 250 A ableitet.

In der PKW-Hybrid-Technik sind Batteriespannungen bis zu 400 V vorgesehen, bei NKW hingegen Spannungen bis zu 850 V. Diese Spannungen liegen in der Spannungsklasse B. Die Hochvolt-Ebene beträgt max. $60 < U \leq 1.500$ V DC, $30 < U \leq 1.000$ V AC rms.

Tab. 1a: Betrachtete Fahrzeugtypen und Leistungsklassen

		Mild Hybrid			Full Hybrid/Plugin		EV (Batt/RE/FC)			Einh.
		12 V	48 V	HV	mid	power	Kleinwagen	Medium	Sport	
max. EM Leistung	motorisch	4	12	20	60	100	60	100	180	kW
max. EM Drehmoment	motorisch	50	150	150	200	300	200	300	500	Nm
DC-Spannung	max. (generatorisch)	15	60	200	400	450	400	400	450/800	V
	min. (motorisch)	12	36	120	300	250	300	300	300/600	V
max. Strom	DC AC	333 350	333 500	167 500	200 600	400 800	200 250	333 450	550/280 1.000/500	A A
Drehzahlverhältnis EM/Kurbelwelle bzw. max. Drehzahl EM		3	1	1	1	1	10–15 k/min		bis 20 k/min	
Leistungs-Verhältnis max./Dauer		2	2	2	2	2,5	1,5	1,5	2	

Quelle: ZVEI

Tab. 1b: Betrachtete Fahrzeugtypen und Leistungsklassen

		Mild Hybrid (bis ca. 40 % Verbrennungsmotorleistung)				Plugin Hybrid	EV/RE/FC			Einh.
		< 7,5 t	7,5–12 t	> 12 t	Bus (18 t)	7,5–12 t	< 7,5 t	7,5–12 t	Bus (18 t)	
max. EM Leistung	motorisch	50	65	120	120	90	100	120	2x 120	kW
max. EM Drehmoment	motorisch	350	450	1.000	1.000	500	350	450	2x 500	Nm
DC-Spannung	max. (generatorisch) min. (motorisch)	400	420	420/800	420/800	420	420	420	800	V
max. Strom	DC AC	180 300	220 350	400/200 450/250	400/200 450/250	300 450	330 450	400 450	400 2x 250	A A
Drehzahlverhältnis EM/ Kurbelwelle bzw. max. Drehzahl EM		1	1	1	1–1,6	1	10 k/min	10 k/min	10 k/min	
Leistungs-Verhältnis max./Dauer		1,5	1,5	2	2	1,8	2	2	2	
Bemerkung	scheint nicht weiter verfolgt zu werden							scheint nicht weiter verfolgt zu werden	Achse mit 2 EM	

Quelle: ZVEI

5.1 Namensgebung ‚Hochvolt‘

„Hochvolt“ bezeichnet im Automobilsektor Spannungen oberhalb von 60 V. Die Unterscheidung der Spannungsklassen in Klein-, Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannung kommt aus der Installations- und Gebäudetechnik, was sich insbesondere bei der genauen Beschreibung von Erdungsverhältnissen und Abgrenzungen/Isolation niederschlägt. Diese Unterscheidung ist zur Verwendung in der industriellen Anwendung

gut geeignet. Für die Beschreibung der Spannungsklassen im Fahrzeug ist die Unterteilung Niedervolt und Hochvolt aussagekräftiger. Auch verdeutlicht sie dem Laien das erhöhte Gefahrenpotential in Verbindung mit der höheren Spannung. Daher wird bei den unter Spannung stehenden Komponenten die Signalfarbe ‚Orange‘ verwendet. Alle energieverteilenden Komponenten werden so gekennzeichnet.

6 Anbindung an die Ladeinfrastruktur

Die Niederspannungsnormen gelten auch für die gesamte Ladeinfrastruktur von E-Fahrzeugen und – gemäß einer Vereinbarung zwischen IEC und ISO aus dem Jahre 2011 – **während des Ladevorgangs** auch für Stromkreise im Fahrzeug, welche mit der Ladeinfrastruktur galvanisch verbunden sind [9]. Lediglich im Falle eines On-Board-Ladegerätes mit galvanischer Trennung oder bei induktiven Ladesystemen ist diese Art der Potentialtrennung im Fahrzeug vorhanden. Bei der DC-Ladung entfällt eine galvanische Trennung im Fahrzeug gänzlich. Die Potentialtrennung muss daher innerhalb der netzseitigen Ladestation gewährleistet sein.

Somit ist davon auszugehen, dass das HV-Netz im Fahrzeug immer vom Energieversorgungsnetz galvanisch getrennt ist. Man spricht daher grundsätzlich von sogenannten IT (Isolated Terra → Isolierte Erdung)-Systemen. Im Ladebetrieb wird das Fahrzeug-Chassis über die Infrastruktur im Sinne der IEC Schutzklasse 1 geerdet.

In diesen IT-Systemen führt immer erst eine beidpolige Berührung der elektrischen Spannungsquelle/Pole zu einer Wirkung (Stromschlag). Deshalb ist es im Gegensatz zur Installations- und Gebäudetechnik im Fahrzeug durch Verwendung eines Isolationswächters möglich, eine Gefährdung bereits beim Auftreten eines Erstfehlers zu erkennen und diesen zu beheben, bevor ein Zweitfehler eine beidpolige Berührung ermöglicht.

Tab. 2: Spannungsebenen

Spannungsebenen im Automobilbereich

Schutz-klasse	Name	Ober-grenze AC V _{eff}	Ober-grenz DC V	geltende Norm	andere gebräuchliche Bezeichnungen	Berühr-schutz	Bemerkung
III	Funktions-kleinspannung	25	60	kein Rechercheergebnis	FELV – Functional Extra Lowvoltage		Kein besonderer Schutz zur sicheren Trennung von anderen Stromkreisen mit höherer Spannung
III	Schutz-kleinspannung	25	60	IEC 50178	PELV – Protective Extra Lowvoltage	ohne	Wenn man zwischen den Stromkreisen einen Potenzialausgleich sicherstellen muss um Funkenbildung zu vermeiden z. B. in Kesselanlagen mit explosiven Gasen, aber auch für HiFi Anlagen
III	Sicherheits-kleinspannung	25	60	IEC 61140	SELV – Safety Extra Lowvoltage	ohne	Gegenüber Kleinspannung besonderer Schutz zu Stromkreisen mit höherer Spannung, wie z. B. Sicherheitstransformatoren
III	Klein-spannung	25	60	IEC 60449	ELV – Extra Lowvoltage	ohne	
III	Klein-spannung	50	120	IEC 60449	ELV – Extra Lowvoltage	mit	
II	Nieder-spannung	1.000	1.500	EN 50110		doppelt	Im Automobilbereich hat sich für diese Spannungsklasse die Bezeichnung ‚Hochvolt‘ durchgesetzt. Damit soll der Tatsache Ausdruck verliehen werden, dass diese Spannungsklasse nicht ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen für den Menschen ungefährlich ist, wie es die 12/24 V Klasse ist
I	Mittel-spannung	ca. 36.000		länder-spezifisch		mit Abstand	speziell ausgebildete Fachkräfte, national geprägte Vorschriften
0, I	Hoch-spannung	> 36.000		länder-spezifisch		mit Abstand	speziell ausgebildete Fachkräfte, national geprägte Vorschriften

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 even-

tuell 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 Berührungs-punkte haben und damit der Spannungs-schluss nahezu ausgeschlossen werden kann.

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

Tab. 3: Spannungslagen im PKW

Komponenten	Mild Hybrid			Full Hybrid/Plugin		EV (Batt/RE/FC)		
	12 V	48 V	HV	mid	power	Kleinwagen	Medium	Sport
Antriebs- und Ladekomponenten								
Elektromotor (Bemessungsspannung)	12	36	120	300	250	300	300	300/600
Inverter DC/AC	15	60	200	400	420	400	400	420/800
Spannungswandler DC/DC	--	60–12	200–12	400–12	450–12	400–12	400–12	800/420–12
Lader AC/DC	--	--	--	--	230/420	230/400	230/400	230/450/800
Batterie	15	60	200	400	420	400	400	420/800
Subkomponenten Leistung								
Kompressor	12	36	120	300	250	300	300	300/600
Heizer	36	36	36/120	36/300	36/250	36/300	36/300	36/300
Elektrische Pumpen	12	36	12	12	12	12	12	12
Lenkung	12	36	12	12	12	12	12	12
Energietransfer Komponenten								
(Traditionelles Bordnetz)	12	12	12	12	12	12	12	12
Energieverteiler	12	60	200	400	420	400	400	420/800
Kabel	12	60	200	400	420	400	400	420/800
Steckverbinder	12	60	200	400	420	400	400	420/800
Trennelemente	12	60	200	400	420	400	400	420/800
Relais/Schütze	12	60	200	400	420	400	400	420/800

→ Fortsetzung von Seite 14

Komponenten	Mild Hybrid			Full Hybrid/Plugin		EV (Batt/RE/FC)		
	12 V	48 V	HV	mid	power	Kleinwagen	Medium	Sport
Integrierte Bauelemente								
Leistungshalbleiter	75	75	250	650	650	650	650	650/1.200
Kapazitäten	16,5	66	220	440	462	440	440	460/880
Widerstände	16,5	66	220	440	462	440	440	460/880
Spulen	16,5	66	220	440	462	440	440	460/880
Relais/Schütze	16,5	66	220	440	462	440	440	460/880
Sicherungen	16,5	66	220	440	462	440	440	460/880
Stromsensoren	12	12	12	12	12	12	12	12
Lagegeber	12	12	12	12	12	12	12	12
Temperatursensoren	12	12	12	12	12	12	12	12

Quelle: ZVEI

Tab. 4: Spannungslagen im NKW

Übersicht Spannungslagen E-Mobilität für NKW, Bus								
Komponenten	Mild Hybrid (bis ca. 40 % Verbrennungsmotorleistung)				Plugin Hybrid	EV/RE/FC		
	< 7,5 t	7,5–12 t	> 12 t	Bus (18 t)	7,5–12 t	< 7,5 t	7,5–12 t	Bus (18 t)
Antriebs- und Ladekomponenten								
Elektromotor (Bemessungsspannung)	280	300	300/600	300/600	300	300	400	600
Inverter (DC/AC-Wandler)	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Spannungswandler (DC/DC-Wandler)	400-12	400-24	420/800-24	420/800-24	420-24	420-12	800-24	800-24
Lader (AC/DC-Wandler)	--	--	--	--	3x400/420	3x400/420	400/420	3x400/800
Batterie	420	420	420/800	420/800	420	420	420	400/800
Subkomponenten Leistung								
Kompressor	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Heizer	12/48	24	24	800-24	24	12	24	800-24
Elektrische Pumpen	12/48	24	420/800-24	24	24	12	24	24
Lenkung (elektro-hydraulisch)	hydraulisch	hydraulisch	hydraulisch	hydraulisch	hydraulisch	(420-12)	(420-12)	(800-24)

Quelle: ZVEI

weiter auf der nächsten Seite →

→ Fortsetzung von Seite 16

Komponenten	Mild Hybrid (bis ca. 40 % Verbrennungsmotorleistung)				Plugin Hybrid	EV/RE/FC		
	< 7,5 t	7,5–12 t	> 12 t	Bus (18 t)	7,5–12 t	< 7,5 t	7,5–12 t	Bus (18 t)
Energietransfer Komponenten								
(Traditionelles Bordnetz)	12	24	24	24	24	12	24	24
Energieverteiler	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Kabel	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Steckverbinder	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Trennelemente	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Relais/Schütze	420	420	420/800	420/800	420	420	420	800
Integrierte Bauelemente								
Leistungshalbleiter	650	650	650/1.200	650/1.200	650	650	650	1.200
Kapazitäten	450	450	450/880	450/880	450	450	450	880
Widerstände	450	450	450/880	450/880	450	450	450	880
Spulen/ Motorwicklungen	450	450	450/880	450/880	450	450	450	880
Relais/Schütze	450	450	450/880	450/880	450	450	450	880
Sicherungen	450	450	450/880	450/880	450	450	450	880
Stromsensoren	12	24	24	24	24	12	24	24
Lagegeber	12	24	24	24	24	12	24	24
Temperatursensoren	12	24	24	24	24	12	24	24

Quelle: ZVEI

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. Batterien reiner Elektrofahrzeuge haben häufig eine Kapazität im Bereich von 16 kWh bis 25 kWh. Einige Fahrzeuge gehen auch deutlich darüber hinaus.

Hybride haben üblicherweise eine stark begrenzte rein elektrische Reichweite, sodass hierfür 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- und 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 300 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 Abschaltelementen, die eine allpolige elektrische Freischaltung der Batterie vom Rest des Fahrzeugs gewährleisten müssen. Darüber hinaus ist noch eine mechanische Trennmöglichkeit der HV-Batterie im Service- und 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 Balan-

cing 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 bereit gestellt 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 Tempera-

turen 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 sowohl 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 Batteriekennwerten, wie beispielsweise State-of-Charge, Depth-of-Discharge, State-of-Health, die auch anderen elektronischen Steuergeräten zur Verfügung gestellt werden.

9 Ladespannungen

9.1 AC-Ladespannungen

Um Elektrofahrzeuge zu laden, bedarf es des Anschlusses und Anpassung der Batteriespannung an die jeweiligen Versorgernetz-

spannungen. Diese Anpassung erfolgt in den Ladegeräten, die heute Bestandteil der Elektrofahrzeuge sind.

Etabliert sind in der EU:	230 V AC einphasig	→ 3,3 kW Peak Ladeleistung
	400 V AC dreiphasig	→ 22 kW Peak Ladeleistung
Außerhalb der EU ebenso:	110 V AC einphasig	→ 3,3 kW Peak Ladeleistung

9.2 Ladespannung DC-Schnellladen

Um den Ladevorgang der Elektrofahrzeuge zu beschleunigen, setzt man heute die Gleichstromschnellladung ein. Hierbei wird die Ladesäule direkt mit der Batterie des Fahrzeugs verbunden. Bei diesem Ladeverfahren ist ein fahrzeugseitiges Ladegerät nicht notwendig. Das setzt allerdings voraus, dass die Ladesäulen sich auf die Spannungsebene der zu ladenden Batterie anpassen und dass

zwischen Fahrzeug (Batterie) und Ladesäule ein Austausch der wesentlichen Kennwerten (Ladezustand, Ladespannung, maximaler Ladestrom) für die Ladung zwischen Ladesäule und Fahrzeug stattfindet. Innerhalb dieser Kommunikation steuert das Fahrzeug den Ladevorgang während die Ladesäule Strom und Spannung regelt.

Von Japan ausgehend hat sich „Chademo“-Schnittstelle der Firma „Tepco“ durchgesetzt. Technische Kenndaten: 500 V, 125 A. Theoretisch kann man damit eine 20 kWh Batterie innerhalb von ca. 20 Minuten nahezu vollladen. Mittlerweile verteilen sich in Japan etwa 1.000 Stationen. Unterschiedliche asiatische Fahrzeuge sind mit dieser Schnittstelle bereits ausgestattet.

Die europäischen Fahrzeughersteller setzen auf die „Combo Typ 2“-Ladeschnittstelle Combined Charging System, die es zu diesem Zweck neu zu entwickeln galt. Diese Schnittstelle ermöglicht sowohl das AC- als auch das DC-Laden. Die meisten europäischen Fahrzeughersteller haben sich darauf geeinigt, dass alle neuen Elektrofahrzeuge ab 2017 diese Schnittstelle bedienen.

Die technischen Kenndaten sind maximal 850 V und 200 A.

Tab. 5: Konzepte Antriebsaggregate

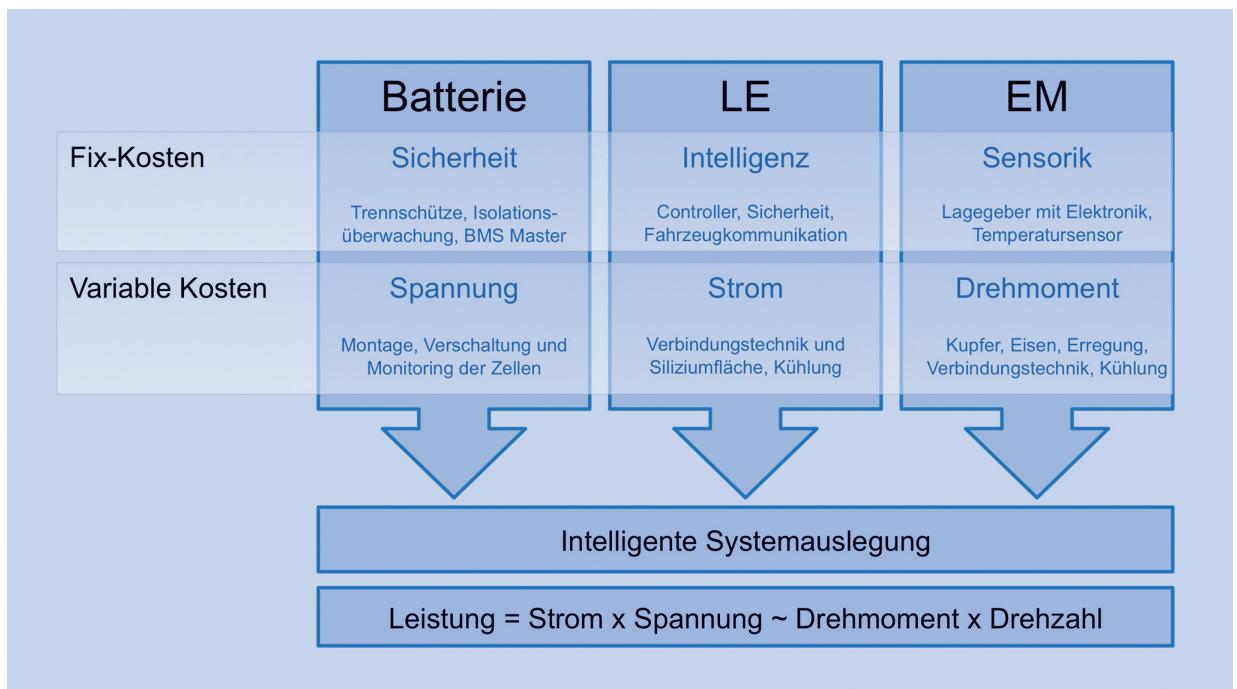
Elektrifizierungstyp		Parallel-Hybrid	Leistungs-verzweigter HEV Sp2	Sp3
Merkmal	48 V	300 V AC 450 V DC	600 V AC 900 V DC	1.000 V AC 1.500 V DC
Leistung (grob)	bis 20 kW	bis 50 kW	150 kW	
Kühlung	Luft	Wasser	Wasser	Wasser
Konstruktion-Gehäuse	offen	geschlossen	geschlossen	geschlossen
Deckelkonstruktion	Kunststoffe und neue Materialien zulässig		Stahlblech, Alu-Druckguß, usw. (Crash-Sicherheit)	
COD, Pilot Line	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
Berührschutz	kein	erforderlich	erforderlich	erforderlich
Klemmstellen	offen (Crashschutz)	geschlossen	geschlossen	geschlossen
Korrosionsschutz	DC-seitig erforderlich (z. B. bei integrierter LE auf EM)		z. B. IP6K7	
Wickeltechnik	Standard Automotiv einsetzbar		Zusatzmaßnahmen bezüglich Isolationsfestigkeit (Dicke, Zwischenphasenisolierung, Abstände ...)	
Windungszahlen		„steigen“ mit Spannung		
Zwischenphasen-isolation	keine erforderlich	empfohlen	obligatorisch	obligatorisch
Prüfspannung	500 V	2x Unenn + 1.000 V	2x Unenn + 1.000 V	2x Unenn + 1.000 V
EMV		kritisch mit steigender Spannung		
Blehpaket		Eisenkreis (Blechschnitt) weitgehend synergetisch zwischen den verschiedenen Spannungslagen		

Quelle: ZVEI

10 Einfluss auf die Kosten der Komponenten

Für eine gute möglichst kostengünstige Auslegung ist auf jeden Fall das Gesamtsystem, bestehend aus Speicher, E-Maschine und Leistungselektronik zu betrachten. Die Kosten treiber sind je nach Komponente individuell unterschiedlich.

Abb. 8: Kosten der Komponenten



Quelle: ZF Friedrichshafen

10.1 Leistungssteigerung mittels Spannungserhöhung

Die Steigerung der elektrischen Leistung erfolgt entweder durch die Strom- oder Spannungserhöhung. Der Leistungssteigerung über eine Erhöhung des Stromes stehen aber systembedingte Engpässe im Weg, weil eine Stromerhöhung zwingend mit einer Querschnittsvergrößerung der internen und externen Kontakte (Leistungsmodule und Stecker) und der Verkabelung einhergehen muss.

Da physikalisch der Erhöhung des Stromes größer als 250 A Grenzen gesetzt sind, wird die Leistungssteigerung im PKW/NKW durch die Spannungserhöhung realisiert.

In den folgenden Detailbetrachtungen wird näher auf die Einzelkomponenten eingegangen.

11 Leistungselektronik

In Wechselrichtern und DC/DC-Wandlern werden Halbleiter eingesetzt, mit denen durch periodisches Ein- und Ausschalten die ausgangsseitigen 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 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 in 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 200 V dominierenden IGBT's verfügen über Sperrspannungen von 600 V und 1.200 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 800 V geeignet sind (siehe Tabelle 3, Seite 14, und Tabelle 4, Seite 15).

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.

12 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 dann die Hauptschütze zeitlich versetzt sequentiell zugeschaltet.

Schütze übernehmen innerhalb von chemischen Energiespeichern auch die Aufgabe des Kurzschluss-Schutzes und müssen daher in der Lage sein, die bei einem Kurzschluss auftretenden Gleichströme sicher abzuschalten. 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 auf ein Minimum reduzieren. 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. Diese technischen Maßnahmen tragen zu signifikant höheren Kosten bei.

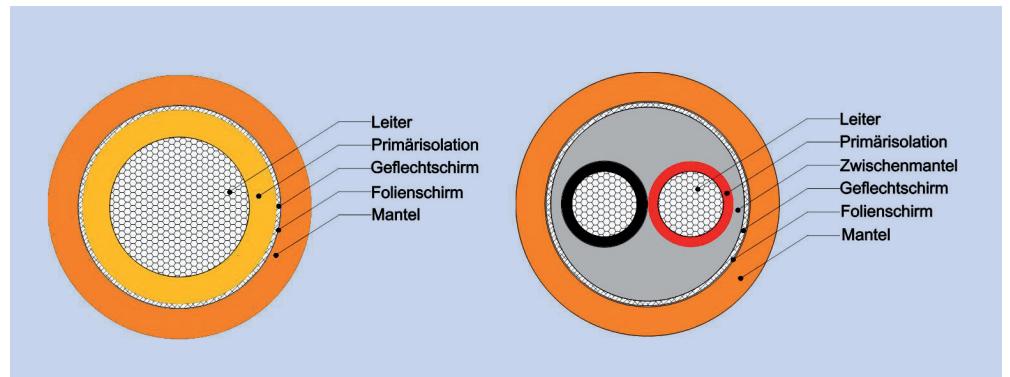
13 Energieverteilung

Leitungen

Die wichtigste Anforderung eines HV-Bordnetzes ist die sichere Übertragung der elektrischen Energie. Hierzu kommen spezielle HV-Leitungen zum Einsatz, die in der Regel eine Schirmung aufweisen. Diese wird aus Gründen der elektromagnetischen Abstrahlung und Verträglichkeit notwendig. Anders als in der HF-Antennentechnik üblich wird der Schirm beidseitig kontaktiert und auf Massepotential gelegt. Innerhalb des Leistungsstrangs – d. h. die zweiphasige Anbindung der HV-Batterie zum Leistungsverteiler sowie von dort ausgehend der dreiphasige Anschluss eines oder mehrerer Elektromotoren – kommen insbe-

sondere einadrige geschirmte Aufbauten zum Einsatz. Gängige Querschnittsbereiche sind hier ausgehend von 16 mm² bis 70 mm². Die mit deutlich weniger Leistung ausgestatteten Nebenaggregate wie Klimakompressor, elektrischer Zuheizer sowie im Falle von Plug-In Fahrzeugen notwendige Einbindung von On-Board-Charger und Vehicle Inlet werden häufig mittels mehradriger geschirmter Leitungen der Querschnittsbereiche 2,5 mm² bis 6 mm² dargestellt. Nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen konstruktiven Aufbau der zum Einsatz kommenden HV-Leitungen.

Abb. 9: Schematischer Aufbau einadrig und mehradrig geschirmter HV-Leitungen



Quelle: Leoni Kabel

Die wesentlichen Auslegekriterien für die einzusetzenden Kabel sind Spannungslage, Stromerwärmung sowie die Umgebungs-temperatur. Im Zuge einer nationalen Standardisierung wurden in der LV 216-2 die Spannungsklassen 2 und 3 nach folgend aufgeführter Tabelle definiert.

Tab. 6: Spannungsklassen

Spannungsklassen		AC		DC
		U_{eff} (U_{RMS})	U_{ss}	U_{DC}
Niedervolt	1 (A ^(*))	≤ 30 V	≤ 42 V	≤ 60 V
Hochvolt	2	≤ 600 V	≤ 849 V	≤ 900 V
Hochvolt	3 (B ^(*))	≤ 1.000 V	≤ 1.414 V	≤ 1.500 V

Diese Tabelle wurde in Anlehnung an ISO 6469-3 erstellt. In der ISO 6722-1 ist die Spannungsklasse 2 mit 600 V AC und 600 V DC spezifiziert und die Spannungsklasse 3 nicht berücksichtigt.

Die Spannungsklassen 2 und 3 sind in der ISO 6469-3 zur Klasse B zusammengefasst.

(*) Spannungsklassenbezeichnung nach ISO 6469-3

U_{ss} Spitzenwert der Spannung

U_{eff} (U_{RMS}) Effektivwert der Spannung (RMS: Root Mean Square)

Quelle: Entwurf LV 216-2: 5. Mai 2013: Hochvolt-Mantelleitungen geschirmt für Kraftfahrzeuge und deren elektrische Antriebe

Zu jeder Spannungslage wurde eine materialunabhängige Geometrie für die geschirmten HV-Leitungen hinterlegt. Diese wurde insbesondere notwendig, um die geometrische Schnittstelle zu den HV-Steckverbindern einheitlich und kompatibel zu gestalten.

Im Vergleich zu Spannungsklasse 2 werden für die Auslegung 1.000 V AC/1.500 V DC höhere Wandstärken in der Primärisolation der Leitungen definiert. Daraus resultierend steigt auch der Außendurchmesser der Leitung. Dies hat einen erhöhten Materialanteil und somit letztendlich eine Erhöhung des Kostenfaktors zur Folge. Da jedoch aufgrund der großen Bandbreite der Spannungsklasse 2 ein Großteil der heutigen Applikationen problemlos abgedeckt werden kann, ist die Spannungslage von HV-Leitungen in Hinblick auf Kosten eine eher geringe Bedeutung bei zu messen.

Wesentlich stärker ins Gewicht fällt die Beanspruchung der HV-Leitungen mit kontinuierlich hohen Stromstärken. Diese gehen quadratisch in die Verlustleistung über die Kabellänge ein und führen somit zu einer Eigenerwärmung der Verbindungskomponenten. In Kombination mit hohen Umgebungstemperaturen, wie beispielsweise innerhalb des Motorraums oder einer Verlegung entlang des Abgasstrangs von Hybridfahrzeugen, werden sehr schnell hohe Temperaturen innerhalb der HV-Leitungen erreicht. Dies führt zum Einsatz sehr temperaturbeständiger Materialien für Primärisolation und Mantel sowie zu einer Erhöhung des Leiterquerschnitts, welche in der Regel aus Kupfer bestehen. Beide Maßnahmen sind als maßgebende Kostentreiber für HV-Leitungen zu sehen. Um Gewicht und Kosten zu sparen wird oftmals Aluminium als Alternative zu Kupferleitern diskutiert.

Somit lässt sich konstatieren dass insbesondere hohe Stromstärken in Kombination mit steigender Umgebungstemperatur im Wesentlichen die Kostentreiber für HV-Leitungen darstellen.

14 HV-Steckverbinder

Ohne eine Bündelung der verschiedenen Produktanforderungen würde es zu einer unüberschaubaren Produktvielfalt von HV-Steckverbinder innerhalb des HV-Bordnetzes kommen. Daher wurden diese Anforderungen im Rahmen des Arbeitskreises AK 4.3.3 der deutschen Automobilhersteller in der LV 215-1 [1] definiert. Dieser Ansatz führt zu einer Standardisierung und Verwendbarkeit der HV-Steckverbinder an verschiedenen Komponenten im Fahrzeug. Um die Nutzung unter den vielen möglichen Einsatzbedingungen zu gewährleisten, wurden mehr als 50 Produktanforderungen festgelegt, z. B.

maximale Betriebsspannung 850 V, Berührschutz nach IPX2B (VDE-Finger), Voreilender Signalkontakt (HVIL), EMV-Anforderung mit 10 A Dauerstrom über die Schirmung. 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 meist im internen Ladegerät statt.

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 Umgebungs-temperatur beim Ladevorgang ist mit 50 °C spezifiziert. Die Glühdrahtbeständigkeit der Ladesteckdose benötigt besondere Zusätze, die die Verarbeitbarkeit und die mechanischen Materialeigenschaften verschlechtern. Steckverbinder im Fahrzeug HV-System haben diese Anforderung nicht.

Bei der Ladesteckdose Typ 2 beträgt die maximale Spannung 500 V AC. Der dargestellte Aufbau ermöglicht die Übertragung von bis zu 70 A einphasig oder bis zu 63 A dreiphasig.

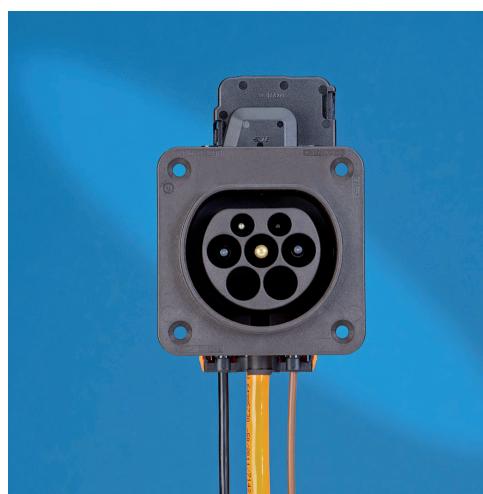
Abb. 10: Dreiphasenstecker



Quelle: Tyco Electronics AMP

Der Dreiphasenstecker (siehe Abb. 10) verbindet die Typ 2 Ladesteckdose mit dem internen Ladegerät und somit das HV-Bordnetz mit dem Energieversorgungsnetz (siehe Abb. 11).

Abb. 11: TYP 2 Ladesteckdose



Quelle: Tyco Electronics AMP

Abb. 12: Combo-Steckdose



Quelle: Delphi Deutschland

14.1 Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung

Abb. 13: HV-Steckverbinder mit Sicherheitsverriegelung



Quelle: Leopold Kostal

Innerhalb der Vielzahl unterschiedlicher Hochvolt-Stecker gibt es Lösungen, die das schnelle Öffnen der Steckerkontakte mittels einer speziellen Verriegelung verhindern. Hintergrund ist die Entladezzeit 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 Anforderung wir in der bestehenden LV 215-1 heute nicht mehr gefordert.

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 alleine als verbindendes Glied zwischen den Komponenten, sondern bezieht ihn in die Auslegung des Gesamtsystems mit ein. Heutige Derating-Kurven nach LV 214-1 [8] 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.

Abb. 14: Electric Vehicle Portable Charging Cordset



Quelle: Delphi Deutschland

15 Laderegler und DC/DC-Wandler

Zur Umwandlung der Wechselspannung aus dem öffentlichen Versorgungsnetz in einen Batteriegleichstrom werden Batterieladegeräte, sogenannte Laderegler, eingesetzt, die bei kleineren Leistungen bis ca. 7 kW im Fahrzeug, also on board, und bei größeren Leistungen wegen der großen Abmessungen und Gewicht extern verbaut werden.

Die Laderegler sollen in späteren Versionen auch die Abrechnungssysteme für öffentliche Ladestationen beinhalten.

Innerhalb des Fahrzeugs gibt es wie aus Abb. 2 und 3 ersichtlich mehrere Spannungsebenen, die durch meist bidirektionale Gleichspannungswandler, sogenannten DC/DC-Wandlern, verbunden sind. Diese wie auch die Laderegler benötigen neben dem eigentlichen Bauraum häufig noch die Anbindung ans Kühlsystem. Um diesen Kühlbedarf und damit auch Bauraum und Bauplatzeinschränkung zu verkleinern, sind hocheffiziente Schaltungskonzepte in den nächsten Jahren zu entwickeln.

Abb. 15: Batterieladegerät



Quelle: Leopold Kostal

16 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:

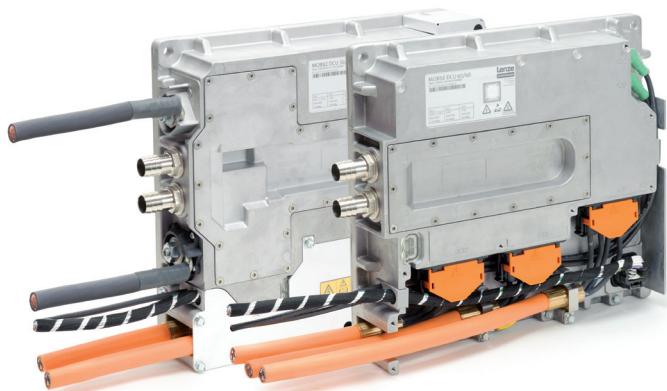
- Die Nenndrehzahl eines Motors bestimmt seine Nennspannung oder umgekehrt, je schneller eine Maschine drehen soll, desto höher muss die Ansteuerspannung des Wechselrichters sein.
- Das Drehmoment eines Motors wird durch die Größe des Stromes bestimmt. Aus diesem Grunde wird das maximale Anfahrmoment 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.

Abb. 16: Inverter und DC/DC-Wandler für Nutzfahrzeuge



Quelle: Lenze Schmidhauser

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.

17 Thermisches Management

Zur Auslegung von Leistungselektroniken auf Lebensdauer im KFZ müssen nicht nur die elektrischen und mechanischen Belastungen ausreichend berücksichtigt werden, sondern auch die thermischen Belastungen und insbesondere die kombinierten sogenannte thermomechanischen Belastungen im Wechselspiel von Funktion und Umweltbedingungen.

Es gibt nur zwei Lösungsansätze, um eine lebensdauergerechte Auslegung von Komponenten und System zu garantieren:

- Ein operatives System mit Kühlmittel, um Verlustwärme aktiv abzuleiten
- Einsatz von robusten Werkstoffen und Technologien in den Baugruppenkomponenten unter Berücksichtigung aller inhärenten temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften.

Kostentreiber des elektrischen Antriebes

Der Hauptkostentreiber der Elektromobilität ist heute sicherlich im Bereich der Energiespeicherung zu suchen. Heutige Batterietechnologien erlauben es nicht, moderate und vergleichbare Reichweiten unter akzeptablen Kosten zu erzielen. Hier spielt die Spannungsebene weniger die Rolle des Kostentreibers, sondern eher die Verwendung der zur Verfügung stehenden Batterietechnologien.

Insgesamt kann man feststellen, dass neben den Kosten für die Energiespeicherung die technische Umsetzung von stationär eingesetzten HV-Komponenten in die automobile Umwelt Einfluss auf die Gesamtkosten darstellen. Dabei müssen aber sicherlich ebenso Sicherheitsaspekte und der Gesamtwirkungsgrad über die Fahrzyklen berücksichtigt werden. Was die Energieverbrauchskosten anbetrifft, sollte insbesondere dem Teillastwirkungsgrad besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

18 Regularien, Normung und Standardisierung

Eine Vielzahl von Normen ist für die Elektromobilität von Relevanz. Dazu zählen solche Normen, die direkt für elektromobile Anwendungen erstellt worden sind. Beispielsweise seien die Normen für den Ladestecker Typ 2 und für elektrische Leitungen in Kraftfahrzeugen für Spannungen größer als 60 V 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 Sicherheitsnormen und Normen, die die Installation betreffen.

Im Rahmen der Aktivitäten der „Nationalen Plattform Elektromobilität“ (NPE) wurden diese Normen vom DKE als Anhang der dort erarbeiteten Normungsroadmap 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.

19 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

19.1 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, über Herzkammerflimmern bis zum Herzstillstand.

Wärmewirkung

Der Stromfluss führt zu Verbrennungen an den Übertrittstellen sowie im Körper zu Eiweißgerinnung.

Hierbei können die Symptome zeitverzögert wahrgenommen werden. Deshalb muss auch bei einem scheinbar leichten Unfall mit HV-Spannung ein Arzt aufgesucht werden.

Chemische Wirkung

Der Strom kann die elektrolytische Zersetzung von Zellen bzw. Zellbestandteilen verursachen, die zu einer Vergiftung des Körpers führen können.

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

19.2 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.

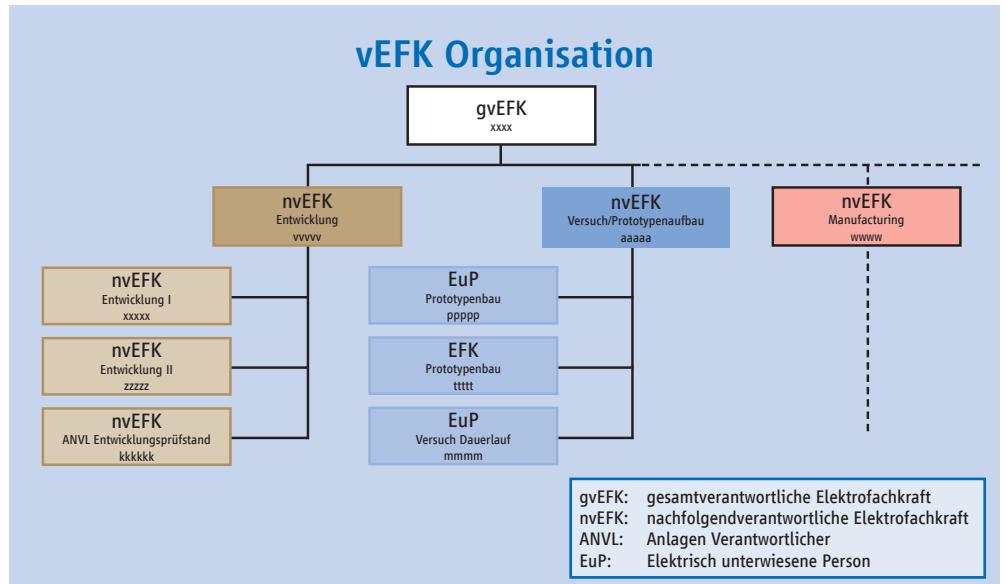
Unternehmen, die bis jetzt ausschließlich in der Kleinspannungswelt tätig waren (12 V-, 24 V-, 42 V-Automotive-Produkte), müssen jetzt Ihre Sicherheitsanforderungen den Hochvolt-Bedingungen anpassen.

Um die Schutzmaßnahmen im erforderlichen Maße sicherzustellen, ist es erforderlich, entsprechend den Regelungen der Normen DIN VDE 1000-100 und DIN VDE 0105-100, die die Vorgaben der §§ 3 Abs. 2 und 13 Arbeitsschutzgesetz sowie auch des § BGV A 3 (Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit) konkretisieren, zu beachten und die erforderliche Anzahl von verantwortlichen Elektrofachkräften und anderer abgestuft befähigter Personen vorzusehen. Die Normen gehen von einer Verantwortungshierarchie aus.

Zwar sind die DIN VDE 1000-100 und die DIN VDE 0105-100 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.

Abb. 17: Organisation Elektrofachkraft, Struktur der Kompetenz



Quelle: ZVEI

19.3 Schutzkonzept

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

19.4 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 Berührschutzes von HV-Geräten sind:

- Die Wahl der Isolation aus festen Isolierstoffen mit Isolationswiderständen > 100 Ω/V DC bzw. > 500 Ω/V AC
- Der Abstand von spannungsführenden Teilen zu metallischen Gehäusen
- Die korrekte Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken

19.4.1 Der Potenzialausgleich

Der Potenzialausgleich 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 Potenzialtrennung der Gerätebereiche mit Hochvolt 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.

19.4.2 Schutzfunktionen

Der Überstromschutz muss in den HV-Geräten gewährleistet sein. Energiespeicher und Leistungselektronik müssen mögliche Kurzschlussströme sicher abschalten. Die Berührung von Spannungen oberhalb 60 V DC müssen beim Öffnen der Kontakte 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 V DC in einer vom Automobilhersteller spezifizierten Zeit reduzieren.

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

„HV-Komponenten müssen durch Auslegung des Systems eine Spannungsfestigkeit entsprechend ISO 6469 aufweisen. Ausnahmen für Wechselrichter sind in Diskussion.“

19.4.3 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 Fahrzeughalter auf den Fehler aufmerksam gemacht bzw. zum Service aufgefordert.

Isolationswächter, die vereinzelt zum Einsatz kommen, werden tendenziell zukünftig integraler Bestandteil und Funktionalität einer Leistungselektronik oder eines Batteriemanagement-Systems werden.

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 Kleinspannungs-Signal-Kontakt im HV-Stecker einem zentralen Steuergerät (Batteriesteuergert) die Öffnung des HV-Kreises signalisiert. Im zentralen Steuergerät wird die Abschaltung des HV-Netzes vorgenommen und die Energiezufuhr vor dem Öffner der HV-Kontakte gestoppt.

20 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.

Hinsichtlich Betriebszeit ergeben sich die größten Unterschiede für das Ladesystem und das Batteriemanagement-System (BMS).

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 Ladeeinheit noch weitere 60.000 Stunden hinzu zu rechnen.

Tab. 7: Lebensdauer-Randbedingungen

	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	2–10 g, teilweise bis 30	2–10 g, teilweise bis 30	

Quelle: ZVEI

Das Batteriemanagement-System 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 elektro-chemischen Eigenschaften temperiert und damit der Betriebstemperaturbereich des Gesamtsystems „Batterie und BMS“ deutlich eingeschränkt werden muss.

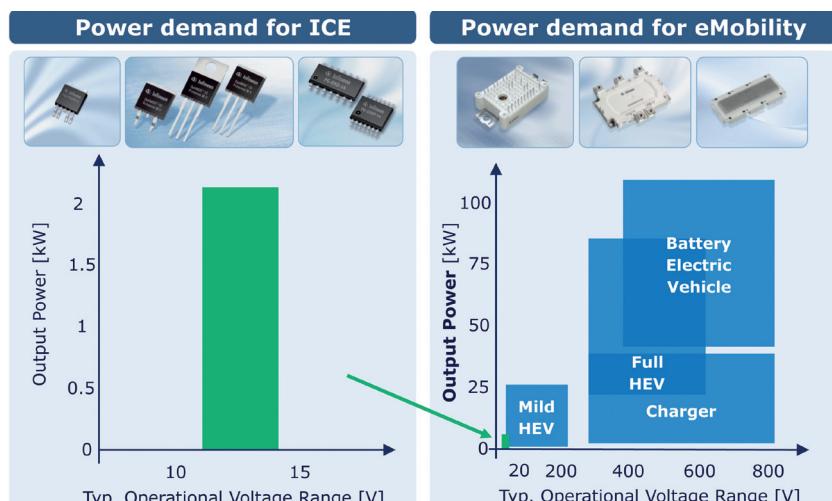
Im Nutzfahrzeug ergeben sich Betriebszeiten von mindestens 50.000 Stunden. Damit liegen die Anforderungen für den Antriebsstrang inklusive Batterie bei LKW und Bussen deutlich höher als beim PKW, während die Anforderungen an das Batteriemanagement und an das Ladesystem in etwa gleich bleiben. Es sind aber zusätzlich die sehr unterschiedlichen Lastprofile zu berücksichtigen, welche im Gegensatz zum PKW, eine deutlich 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 Energiefloss. 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 Energiefloss. Die gesamte Energiemenge „fließt“ hierbei über elektrische „Stellglieder“. Die hierfür notwendige Leistungselektronik ist damit in einer ganz anderen Dimension angesiedelt.

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

Abb. 18: Leistungsklassen im Vergleich



ICE = internal combustion engine

HEV = hybrid electric vehicle

Quelle: Infineon Technologies

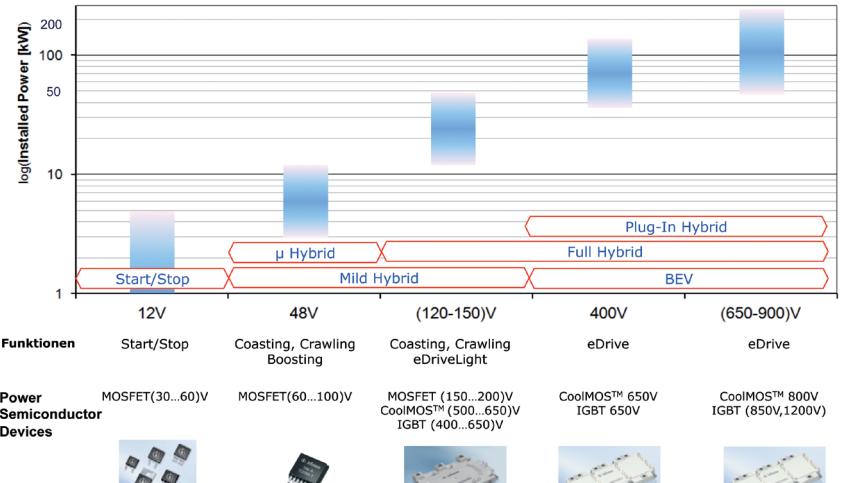
Neben den Ausfällen, die sich im Zusammenhang mit der Spannung (Überschläge durch zu klein gewählte Luft- und Kriechstrecken) und dem Strom ergeben, sind insbesondere spezifische Ausfallmechanismen durch thermische Beanspruchung wie im Abschnitt ‚Thermal Management‘ beschrieben zu betrachten.

Bei den Ausfallmechanismen in den Leistungshalbleitern kommt, wie bereits angedeutet, der Betrachtung der Materialverbünde aus verschiedenen Metallen, Metallegierungen, Keramik zur Isolation, Silizium als eigentlichem Leistungsschalter usw. eine besondere Bedeutung zu. Denkt man an die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten wird schnell klar, dass es bei Temperaturwechseln, die sich aus der Verlustleistung beim Schalten der Halbleiterbauelemente und den elektrischen Widerständen der Materialien ergeben, zu einem erheblichen thermo-mechanischen Stress des Materialverbundes kommt.

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

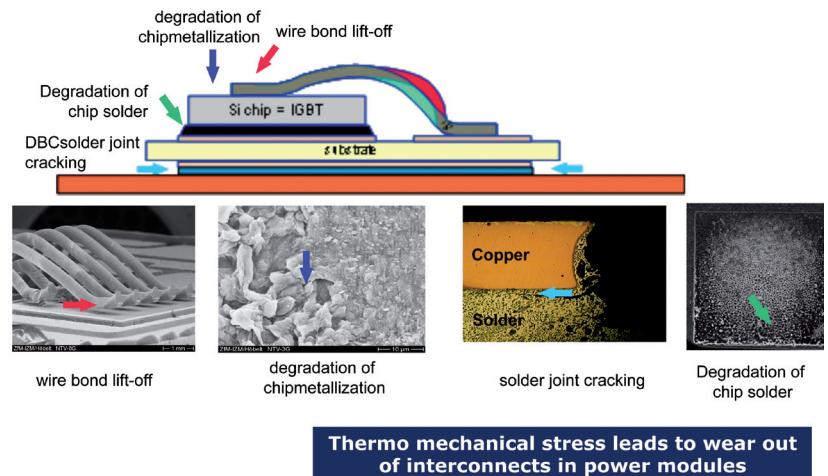
Hierbei werden durch Maximaltemperatur und Anzahl der Belastungszyklen die Grenzen gesetzt. Diese wiederum sind vom Fahrprofil und den Kühl Eigenschaften des Systems abhängig.

Abb. 19: Leistungsbauelemente/Module und Leistungsklassen der Leistungselektronik



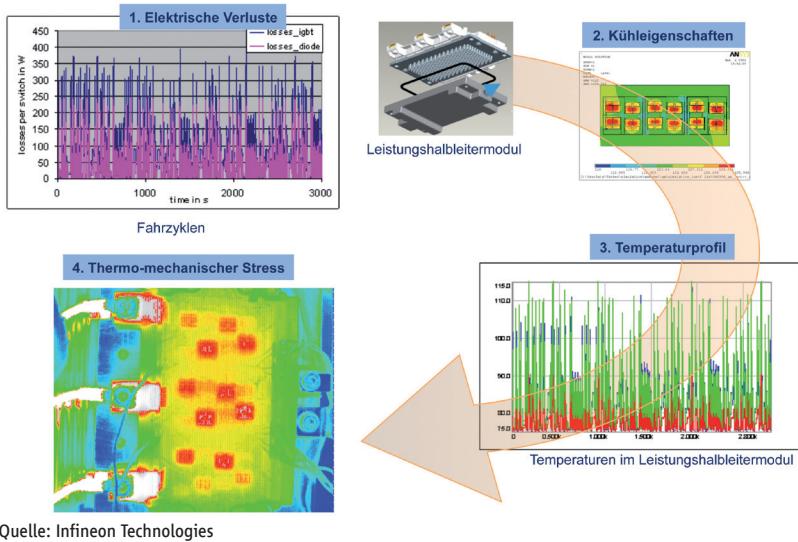
Quelle: Infineon Technologies

Abb. 20: Ausfallursachen bei einem Leistungsmodul



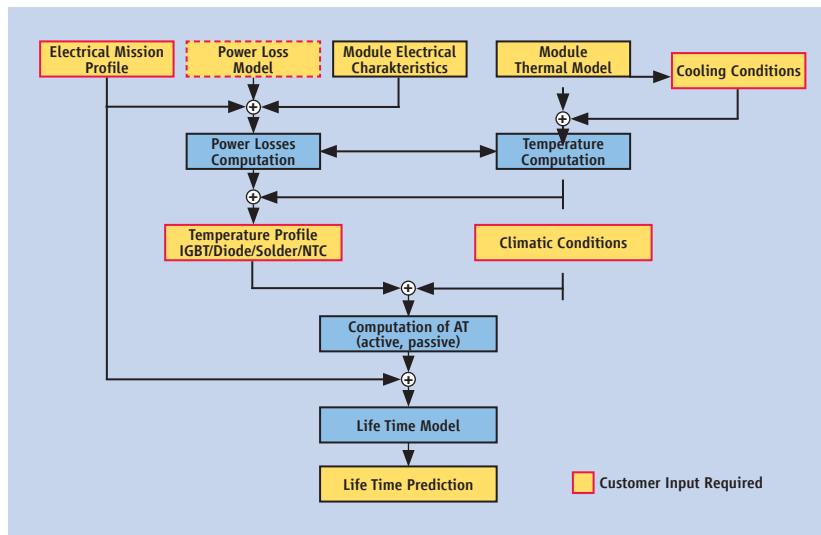
Quelle: Infineon Technologies

Abb. 21: Vom Fahrprofil zum thermo-mechanischen Stress in der Leistungselektronik



Quelle: Infineon Technologies

Abb. 22: Modell zur Lebensdauervorhersage



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 Ladereglern 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 Gehäuse 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.

21 Offene Fragen

21.1 Weitere Optimierungsgrößen

Hinsichtlich Bauvolumen und Gewicht sind bisher elektrische Komponenten nicht auf minimales Bauvolumen und Gewicht optimiert. Im Fahrzeug sind diese Größen aber unabdingbar. Somit wird in den nächsten Jahren ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt auf deren Optimierung gelegt werden müssen, um international wettbewerbsfähig zu bleiben.

22 Ausblick und Fazit

Mobilität wird in der Zukunft durch elektrische Antriebskonzepte bestimmt werden, sei es als Hybride in allen Varianten oder durch reine E-Fahrzeuge. Damit verbunden werden jenseits der heutigen 12/24 V 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 automobile Umgebung zuverlässig und sicher zu implementieren. Dies ist ein evolutionärer Prozess, der mit jeder Applikation Verbesserungen aufzeigen und innerhalb der Komponenten ebenso die dazu notwendige Standardisierung einbringen wird – damit verbunden ebenso die Produktkosten verringern wird.

Trotzdem wird sich das automobile Umfeld an die neuen Bedingungen anpassen müssen, sowohl in der Entwicklung und Herstellung, als 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 Automobile 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 bidirektonaler Speicherkonzepte (Supergrids). Hier ist sicherlich noch Entwicklungsarbeit notwendig. Die Zukunft der Elektromobilität wird spannend bleiben und unsere Ingenieure und Techniker noch lange Zeitbeschäftigen, möglicherweise mit dem Ziel, in ferner Zukunft ganz auf fossile Energieträger verzichten zu können.

23 Anhang

23.1 Halbleitermaterialien für die Aufbau- und Verbindungstechnik

Der Einfluss und die Bedeutung der Materialien nehmen mit der fortschreitenden Erhöhung der Leistungsdichte, der Schaltfrequenzen sowie mit den erhöhten Zuverlässigkeitssanforderungen zu. In den meisten Standard-Leistungselektronikmodulen erfolgt die Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) durch die Lötverbindung mit dem bleifreien SnAg (früher auch SnPb/Ag) Lot bzw. durch das Bonden mit dem Aluminiumdickdraht. Diese Materialien und die entsprechenden Prozesse sind seit Jahren bekannt und werden erfolgreich eingesetzt.

Durch die ständige Erhöhung der Leistungsdichte verbunden mit den erhöhten Betriebstemperaturen (150 °C, 175 °C und höher) sowie den Anforderungen an verbesserte Powerzyklen-Festigkeit und Langzeitzuverlässigkeit (mehr als 15 Jahre für Automotive-Anwendungen) kommen diese AVT-Materialien an Ihre Grenzen. Darüber hinaus stellen die großen Temperaturhübe, wie sie z. B. beim Kaltstart im Winter vorkommen, eine besondere Herausforderung hinsichtlich der Powerzyklen-Festigkeit.

Die Anforderungen an die AVT-Materialien steigen zusätzlich durch den Einsatz von neuen Halbleitermaterialien wie SiC oder GaN. Diese Halbleiter ermöglichen deutlich schnellere Schaltfrequenzen und niedrigere Schaltverluste erhöhte Leistungsdichten und können bei wesentlich höheren Sperrsichttemperaturen noch zuverlässig arbeiten. Aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit ist SiC auch für höhere Spannungsklassen und Leistungsdichten sehr gut geeignet.

Aus allen diesen Gründen ergibt sich der Bedarf an optimierten Materialien mit den verbesserten mechanischen aber auch thermischen und elektrischen Eigenschaften.

23.1.1 Neue Lotlegierungen

Eine Vielzahl von Projekten hat sich insbesondere im Rahmen des Übergangs zu bleifreien Loten mit Verbesserungen der thermozyklischen Beständigkeit und Hochtemperatur-eigenschaften der Lotlegierungen beschäftigt. Typische Herausforderung ist bei diesen Arbeiten der Konflikt aus möglichst niedriger Prozesstemperatur beim Löten (Belastung der Bauelemente, Verdrahtungsträger, usw.) und der angestrebten Hochtemperatur-eigenschaften der Fügeverbindung. Eine bloße Steigerung des Schmelzpunkts ist deshalb nicht zielführend.

Die Beispiele sind spezielle Legierungen wie z. B. das 6-Stoffsystem SnAgCuBiSbNi (gemäß Projekt auch als InnoLot® bezeichnet) und die HT1-Legierung (SnAgCuIn + Kristallmodifizierer). Die beiden neuen Legierungen haben einen ähnlichen Schmelzpunkt wie SnAg-Lot und ermöglichen Steigerungen der thermozyklischen und Hochtemperatur-eigenschaften. Auf der Leistungselektronik-Module-Ebene lässt sich dadurch eine geringe Erhöhung der maximal erlaubten Betriebstemperatur bzw. eine geringe Verbesserung der Powerzyklen-Festigkeit erreichen.

23.1.2 Diffusionslöten

Eine deutlichere Verbesserung der Hochtemperatur-eigenschaften wird durch die isotherme Erstarrung des Lotes (Diffusionslöten) erreicht.

Bei den konventionellen Lötverbindungen bildet sich eine eutektische Zone in der Mitte der Lötstelle und zum Metall die isotherm erstarrten intermetallischen Zonen. Die eutektische Zone der konventionellen Lote bestimmt die thermo-mechanischen Eigenschaften. Sie hat beim SnAg-Lot einen Schmelzpunkt von 221 °C und beim SnPb-Lot 183 °C.

Beim Diffusionslöten (dünne Schichten kleiner als 10 µm) dagegen erstarrt das Lot (z. B. SnCu, Schmelzpunkt 227 °C) isothermisch und verwandelt sich komplett in die intermetallische Phase. Die intermetallischen Phasen haben einen deutlich höheren Schmelzpunkt als das konventionelle Lot selbst: Cu₃Sn-Phasen 676 °C und Cu₆Sn₅-Phasen 415 °C. Bei den dünnen Schichten müssen jedoch spezielle DCB-Substrate mit einer geringen Rauigkeit verwendet werden, ein Standard DCB-Substrat hat eine Rauigkeit von ca. 20 µm.

Bei den dickeren Schichten wird das Diffusionslot mit einem Grundstoff, z. B. Kupfer gefüllt. Das geschmolzene Lot diffundiert in den Grundstoff bis der ganze Lötpalt isotherm erstarrt ist.

Bei den Diffusionslötprozessen muss das Lot solange flüssig gehalten werden bis durch die Diffusion der Lötpalt vollständig erstarrt ist. Bei den Diffusionslötprozessen muss das Lot länger als bei den konventionellen Lötprozessen flüssig gehalten werden, besonders bei dickeren Schichten. Ein vorzeitiges Abbrechen des Diffusionslötprozesses würde zu einer eutektischen Restzone führen und die mechanischen Eigenschaften somit negativ beeinflussen. Die große Herausforderung bei den dickeren Schichten ist eine gleichmäßige, porenfreie Verbindungsschicht zu erreichen.

23.1.3 Silbersintern

Eine noch deutlichere Verbesserung der Hochtemperatur-eigenschaften und besonders der Powerzyklen-Festigkeit wird durch das Silber-Niedertemperatursintern erreicht.

Die Silber-Sinterschicht hat deutlich bessere Wärme- und elektrische Leitfähigkeit sowie höhere Temperaturbelastbarkeit (Schmelzpunkt von Ag ist 961 °C vs. SnAg-Lot 221 °C).

Darüber hinaus lassen sich beim Einsatz von Sinterpasten die Wärmeleitfähigkeiten von über 200 W/mK realisieren.

Der Sinterprozess unterscheidet sich vom Lötprozess:

- Löten: unter Wärme (230–250 °C für SnAg-Lot) schmilzt das Lot, an den Grenzen zum Metall finden Diffusionsprozesse statt und intermetallische Phasen entstehen. Das Löten unter Vakuum hilft die Porenbildung zu minimieren. Nach dem Löten werden die Flussmittelrückstände gewaschen.
- Sinterpaste: unter Wärme (größer als 220 °C) und Druck (5–30 MPa, abhängig von der Fläche der IGBTs/Dioden) erfolgt eine Verdichtung der Silberpartikel durch die Diffusionsprozesse. Das Drucksintern hilft die Porosität zu reduzieren, speziell bei den großflächigen Halbleitern. Eine Reinigung nach dem Sintern ist nicht notwendig.
- Sinterkleber: bei Wärme härtet der Kleber aus und die Silberpartikel versintern. Ein Druck ist nicht erforderlich. Die Reinigung nach dem Aushärteten ist ebenfalls nicht notwendig.

Der Sinterkleber kombiniert die Vorteile der stoffschlüssigen Verbindung von Ag-Sinterpasten und die hohen Adhäsionskräfte von Ag-Leitklebern in einem Pasten-System. Im Vergleich zum Lot hat der Sinterkleber eine höhere Flexibilität. Dadurch kann er besser die thermo-mechanischen Belastungen, die durch Unterschiede im WAK zwischen dem Substrat und dem Halbleiter entstehen, kompensieren. Das kann besonders bei den größeren Halbleitern relevant sein. Der Silberkleber hat eine niedrigere Wärme- und elektrische Leitfähigkeit als die Sinterpaste selbst. Bei dem Sinterkleber scheinen die Betriebstemperaturen von bis zu 200 °C beherrschbar.

Mit der Sinterpaste wurden Verbindungen aufgebaut die selbst bei sehr hohen Temperaturen wie 300 °C noch immer thermo-mechanisch stabil sind.

23.1.4 Bonddrähte und -bändchen

Eine Steigerung der Temperaturbeständigkeit und Powerzyklen-Festigkeit durch z. B. Sintern erfordert auch eine Optimierung der Bonddrahtverbindung. Das Ultraschall-Wedge-Bonden mit Aluminium-Dickdraht bis zu einer Drahtstärke von 500 µm stellt den Standardprozess dar.

Durch den Einsatz von Aluminium-Bändchen kann man die Powerzyklen-Festigkeit leicht verbessern.

Eine deutliche Verbesserung der Powerzyklen-Festigkeit lässt sich durch den Einsatz von Cu-Drähten und -Bändchen erreichen. Kupfer hat deutlich bessere elektrische und thermische Leitfähigkeit als Aluminium.

23.1.5 Zugfestigkeit

Typische Bondkraft ($\varnothing 300 \mu\text{m}$)

Die deutlich höhere Zugfestigkeit und Härte von Cu bedarf höherer Kräfte beim Bonden.

Ein Mittelweg sind Aluminium beschichtete Kupferkern-Bonddrähte und -Bändchen:

- Durch die Aluminium-Beschichtung lassen sich diese Bonddrähte deutlich leichter bearbeiten als die reinen Cu-Drähte
- Der Kupferkern sorgt für bessere thermische, elektrische und mechanische Eigenschaften und somit für eine bessere Powerzyklen-Festigkeit als bei den reinen Al-Drähten.

23.1.6 Endoberflächen der Chips, Substrate, Frames

Beim Einsatz von neuen Materialien wie Silbersinterpasten oder Cu-Bonddrähte muss beachtet werden, dass die Endoberflächen der Halbleiter, der Substrate und der Frames an diese Prozesse angepasst werden. Die Sinterpasten werden zurzeit bevorzugt auf den Ag-, Au- und Pd-Oberflächen eingesetzt. Im Rahmen des ProPower-Projektes werden auch neue funktionale Oberflächen basierend auf Kupfer sowie die entsprechenden benötigten Pasten entwickelt.

24 Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom
ASC	Active Chassis Control / Actives Fahrwerk
Batt	Batterie
BEV	Battery Electric Vehicle / Batterieelektrisches Fahrzeug
BMS	Batteriemanagement-System
CHAdeMO	in Japan entwickelte markenübergreifende elektrische Schnittstelle eines Batteriemanagementsystems für Elektroautos (charge de move)
COD	Chemical Oxygen Demand / Chemischer Sauerstoffbedarf
DC	Gleichstrom
E/E	Elektrik/Elektronik
EM	Elektromotor
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EPS	Electric Power Steering / Elektrische Servolenkung
EV/BEV	Electric Vehicle / reines Batteriefahrzeug
FC	Fuel Cell / Brennstoffzelle
FSH	Frontscheibenheizung
HEV	Hybrid electric Vehicle / Hybridelektrokraftfahrzeug
HV	Hochvolt
HVIL	High Voltage Interlock Loop
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	insulated-gate bipolar transistor / Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode
IT	Isolated Terra / isolierte Erdung
IPX2B	Electric Shock Protection Standard
ISG	Integrierter Starter-Generator
ISO	International Organisation for Standardisation
KFZ	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LE	Leistungselektronik
LKW	Lastkraftwagen
LV	Lowvoltage
LV 216	Liefervorschrift (der OEM) 216
M	Elektrische Antriebsmaschine (Motor)
M/G	Motor/Generator
MOSFET	metal oxide semiconductor field-effekt transistor, Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
Nm	Newtonmeter
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
NKW	Nutzkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
RE	Range Extender
RMS	Root Mean Square / Quadratisches Mittel
SiC-Deode	Schottky-Deode, hat keinen p-n-Übergang (Halbleiter-Halbleiter-Übergang) sondern einen (sperrenden) Metall-Halbleiter-Übergang
SP2 und SP3	Spalte
TF	Task force
vEFK	verantwortliche Elektrofachkraft
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
Wh/kg	Wattstunden pro kg Masse, Energieinhalt pro Gewicht
Wh/l	Wattstunden pro Volumen, Energievolumen, Energieinhalt pro Volumen
V	Volt

25 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] LV 215-1: Elektrik/Elektronik Anforderung an HV-Kontaktierungen, September 2011
- [2] IEC 60529 (DIN 40050-9): Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code), Oktober 1991
- [3] IEC 60664-1: Isolationskoordinaten für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen, Januar 2008
- [4] ISO 6469-3: Electrically propelled road vehicles – Safety specification – Part 3: Protection of persons against electric shock, November 2010
- [5] LV 216-2: Hochvolt – Mantelleitungen geschirmt für Kraftfahrzeuge und deren elektrische Antriebe, Juni 2011
- [6] IEC 62196-1: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen
Teil 1: Generelle Anforderungen, Oktober 2011
- [7] IEC 62196-2: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen
Teil 2: Anforderung an und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsevorrichtungen, Mai 2010
- [8] LV 214-1: KFZ Steckverbinder – Prüfvorschrift, März 2010
- [9] http://www.iso.org/iso/mou_ev.pdf



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