



© Friedrich Neumeier | Dräxlmaier

Von 400 auf 800 V – Auswirkungen auf das Hochvoltbordnetz

AUTOREN



Dr. Klaus Specht
leitet die Abteilung
Product Benchmark &
Process bei der Dräxlmaier
Group in Vilsbiburg.



Dr. Martin Gall
ist CTO bei der Dräxlmaier
Group in Vilsbiburg.



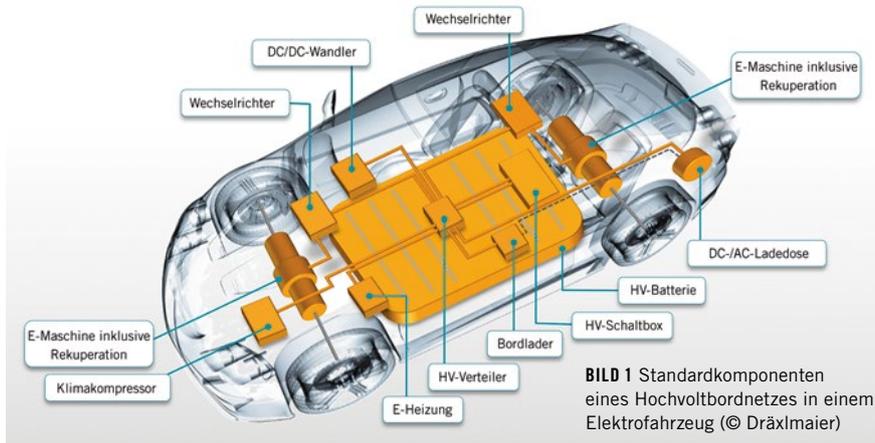
Georg Scheidhammer
leitet das Ressort Strategie &
Innovationen der Entwicklung
bei der Dräxlmaier Group
in Vilsbiburg.

Bald kommen die ersten vollelektrischen Serienfahrzeuge auf den Markt, die mit 800-V-Technik ausgerüstet sind. Durch die, im Vergleich zu konventionellen 400-V-Systemen, deutlich erhöhte Spannungslage ergeben sich zahlreiche Vorteile. Zugleich müssen die verbauten Komponenten aber auch besonders hohen Ansprüchen genügen. Welche konstruktiven Anpassungen dadurch insbesondere im Bereich des Bordnetzes nötig werden, beschreiben Experten von Dräxlmaier.

SCHLÜSSELKRITERIEN FÜR DIE ELEKTRIFIZIERUNG

Um eine höhere Marktdurchdringung und Akzeptanz auf Nutzerseite zu generieren, muss die Elektromobilität bei bestimmten Kernkompetenzen überzeugen: Neben dem Anschaffungspreis und der Reichweite betrifft dies vor allem die Ladedauer und das Vorhandensein außer- und innerstädtischer Ladeinfrastruktu-

ren. Die Verbesserung dieser Schlüsselkriterien stellt die Automobilhersteller vor neue Herausforderungen, die durch eine kontinuierliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hochvolttechnik gemeistert werden können. Am Ende des Prozesses stehen höhere Reichweiten, kürzere Ladezeiten und stärkere Fahrleistungen. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, das Fahrzeuggewicht möglichst gering zu halten.



Diese Entwicklungsziele machen auch Anpassungen im Bereich des Hochvoltbordnetzes notwendig, dessen typische Komponenten in **BILD 1** in Anlehnung an die Norm LV 123 schematisch dargestellt sind. Neben dem Einsatz neuer oder modifizierter Bauteile, die den zukünftigen Anforderungen gewachsen sind, muss im Rahmen der Produktsicherheit ein besonderes Augenmerk auf die Bordnetzarchitektur, deren Auslegung, Konstruktion, Prüfung sowie deren Diagnose gelegt werden.

EINFÜHRUNG DER 800-V-TECHNIK

Viele der heute schon verfügbaren Elektrofahrzeuge werden mit einer Bordnetzspannung von 400 V ausgeliefert. Dabei gilt eine Erhöhung der Spannungslage als wirkungsvolle Stellschraube zur Optimierung der Leistungsfähigkeit. Daher sind bereits Systeme mit 800 V für den Serieneinsatz angekündigt. Durch die verdoppelte Spannung kann in der gleichen Zeit bei gleicher Stromstärke wesentlich mehr Leistung übertragen werden, was zu deutlich kürzeren Ladezeiten führt. Rein rechnerisch ist gegenüber einem 400-V-System sogar eine Halbierung der Ladezeit möglich, was sich aus der nach der Zeit t umgestellten Gleichung für die elektrische Energie E ergibt, **BILD 2**. Trotzdem können dank eines ähnlichen Stromstärkeniveaus wie im 400-V-Bordnetz die Leitungsquerschnitte nahezu unverändert bleiben, wodurch sich am Gewicht und den potenziellen Wärmeverlusten kaum etwas ändert. Beides kommt der Energieeffizienz des Gesamtsystems zugute.

HERAUSFORDERUNGEN BEIM SCHNELLLADEN

Durch das Verwenden einer leistungsfähigen 800-V-DC-Schnellladeinfrastruktur sowie an die erhöhte Spannung angepassten Fahrzeugkomponenten – darunter Hochleistungsstecker und Highperformance-Batteriezellen – kann die Dauer bis zum Erreichen eines 80%igen Ladezustands bei gängigen Batteriekapazitäten auf unter 20 min reduziert werden. Die Ladezeit wird dabei durch das schwächste Glied der Kette bestimmt – was bedeutet, dass das Bordnetz beim Einsatz einer leistungsfähigeren Batterie so gestaltet werden muss, dass es nicht zu einem Flaschenhals wird. **BILD 2** zeigt dabei schematisch das Zusammenwirken der Ladeinfrastruktur mit Fahrzeugkomponenten auf Basis der 800-V-Technik.

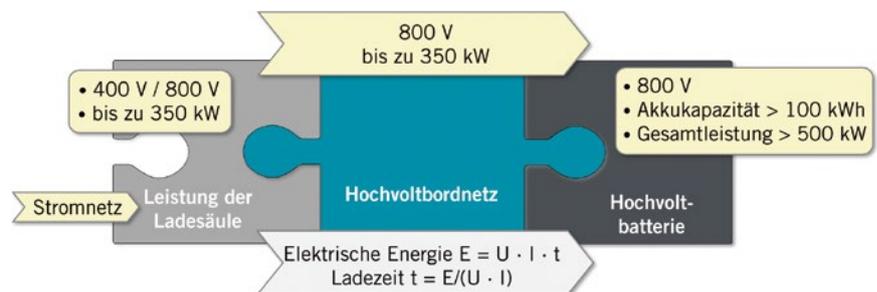
Die stärkste Dauerbelastung des Hochvoltbordnetzes tritt dabei nicht im Fahrbetrieb, sondern während des Ladevorgangs auf. In **BILD 3** ist hierzu der Stromprofil- und Temperaturverlauf einer

Komponente – beispielsweise eines Stecksystems, einer Leitung oder einer Stromschiene – im Hauptstrompfad eines 800-V-Elektrofahrzeugs dargestellt. Die Grafik veranschaulicht exemplarisch die Auswirkungen eines Test-Fahrprofils in der linken sowie eines 800-V-DC-Schnellladevorgangs in der rechten Bildhälfte. Die Aufzeichnungsdauer des Fahrprofils erfolgt dabei über den Zeitraum von 0,5 h, der Ladevorgang ist mit 20 min etwas kürzer.

Des Weiteren kann der Grafik entnommen werden, dass beim Fahren hohe Stromspitzen von bis zu 750 A erreicht werden. Rechnerisch ergibt sich aufgrund des dynamischen Laststromverlaufs allerdings ein Effektivwert von lediglich 230 A. Die Temperaturerhöhung (rote Linie) erfolgt in diesem Betriebszustand nahezu logarithmisch auf etwa 95 °C.

Beim anschließenden Laden steigt die Temperatur der Komponente durch die permanente Belastung noch einmal deutlich an. Das stufenweise Absinken des Ladestroms wird durch die eingesetzten Batteriezellen sowie ihre thermische Leistungsfähigkeit vorgegeben – die anderen Bordnetzkomponenten richten sich entsprechend danach aus. Geladen wird anfangs mit 500 A, nach dem Überschreiten einer Temperatur von etwa 140 °C findet eine Reduktion auf 400 A statt. Im zeitlichen Verlauf sinkt die Stromstärke beim Erreichen bestimmter Temperaturschwellen weiterhin stufenweise ab. Durch die Kombination aus permanenter Energieübertragung und einer hohen Stromlast erreicht der Effektivwert beim Ladevorgang 350 A und liegt damit deutlich höher als während des Fahrbetriebs.

Diese hohen Energie- beziehungsweise Leistungsaufkommen in den Fahr- und Ladesituationen stellen eine starke Belastung für die Komponenten des



800-V-Bordnetzes und erfordern daher eine entsprechend angepasste konstruktive Auslegung des Gesamtsystems. Gerade die Stromspitzen im Fahrbetrieb können bei kleineren Komponenten mit geringeren Wärmekapazitäten oder schlechter Temperaturleitfähigkeit die Lebensdauer stark reduzieren. Beim Schnellladen muss hingegen besonders der hohe Effektivwert des Ladestroms für die thermische Auslegung beachtet werden.

VORTEILE BEIM THERMOMANAGEMENT

Theoretisch verhält sich die Temperatur des Bordnetzes proportional zur Stromstärke im Quadrat. Bei doppelter übertragener Nutzleistung würde man die gleichen ohmschen Verluste der Leitung und damit die gleiche Erwärmung im Bordnetz erzeugen. Dies gilt unter der Annahme, dass das Bordnetz auf ein Stromstärkeniveau ausgelegt wird, das mit dem eines konventionellen 400-V-System vergleichbar ist und über identisch ausgeführte Leitungsquerschnitte verfügt. Dies ergibt sich aus den folgenden rechnerischen Überlegungen:

$$P_{N_{800V}} = U_{400V} \cdot I \quad \text{und}$$

$$P_{N_{400V}} = U_{800V} \cdot I \quad \text{ergeben}$$

$$P_{N_{800V}} = P_{N_{400V}} \cdot \frac{U_{800V}}{U_{400V}} = 2 \cdot P_{N_{400V}}$$

Nimmt man statt einer konstanten Stromstärke eine identische Nennleistung an, ist beim Einsatz eines 800-V-Systems im Vergleich zu einem 400-V-System nur ein Viertel des Temperaturanstiegs ausgehend von der Umgebungstemperatur zu erwarten:

$$\Delta \theta = R_{Th} \cdot \dot{Q} = R_{Th} \cdot P_V = R_{Th} \cdot I^2 \cdot R_{Ohm}$$

daraus folgt

$$\Delta \theta_{800V} = \Delta \theta_{400V} \cdot \left(\frac{400V}{800V}\right)^2 = \frac{1}{4} \Delta \theta_{400V}$$

Dies trägt wesentlich zur Effizienz der 800-V-Technik gegenüber den derzeit eingesetzten Komponenten mit geringerer Bordnetzspannung bei.

GEOMETRISCHE AUSLEGUNGEN

400- und 800-V-Systeme werden anhand der Norm LV 123 in die gleiche Span-

nungsklasse B eingeteilt. Allerdings wird das 800-V-Netz in die Spannungsebene HV_3 gegenüber HV_2a bei 400 V eingeordnet. Daraus ergeben sich konstruktiv keine Veränderungen für die notwendigen Luftstrecken.

Bei Betrachtung der nötigen Kriechstrecken nach IEC 60664-1 sieht die Situation anders aus: So ist zum Beispiel bei einem Hochvoltstecker mit dem Verschmutzungsgrad 2 und der Isolierstoffgruppe 1 eine Verdoppelung der Wegstrecke von 2 mm auf 4 mm bei direkter Gegenüberstellung von 800-V- und 400-V-Technik notwendig. Analog dazu verhalten sich auch die Isolationswiderstände. Beispielsweise ist bei Anwendung der Norm LV 123 auf entsprechend ausgelegte Hochvoltleitungssätze eine Verdoppelung von 25 MΩ (500 V Prüfspannung) auf 50 MΩ (1000 V Prüfspannung) einzuplanen.

WERKSTOFFE FÜR HOCHVOLTANWENDUNGEN

Die in Hochvoltkomponenten zu verwendenden Materialien werden durch verschiedene allgemeine Spezifikationen festgelegt, darunter auch die Norm LV 123. Dennoch muss die konkrete Ausgestaltung bei jedem Fahrzeug beziehungsweise jeder Fahrzeugkategorie – beispielsweise Hybrid- oder Elektrofahrzeug – gesondert angepasst werden.

Komponenten im 400- und 800-V-Bordnetz sind gleichermaßen für den Temperaturbereich von -40 bis +140 °C auszulegen. Hierbei sind die thermomechanischen Eigenschaften und auch die

konstanten Materialkennwerte wie Durchschlagsfestigkeit oder Leitfähigkeit zu beachten. Im Rahmen von Alterungsuntersuchungen und Derating-Tests werden die Materialien zudem hinsichtlich ihrer geometrischen Auslegung getestet. Bauteile aus Kunststoff müssen zudem weitere Spezifikationen in Bezug auf ihr Brandverhalten einhalten.

Letztendlich ist die Materialauswahl für 400- und 800-V-Systeme aufgrund der genormten Erprobungsspezifikationen für Hochvoltkomponenten nahezu identisch.

ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT

Bei den elektromagnetischen Eigenschaften gibt es hingegen Differenzen zwischen den beiden Spannungslagen. Elektromagnetische Störanteile und Schirmströme entstehen hauptsächlich durch die Umrichtung von Gleich- auf Wechselspannung im Wechselrichter. Im Moment des Schaltens ist der Spannungsabfall über die Induktivität gleich der Bordnetzspannung. Dies führt beim 800-V-Bordnetz im Vergleich zum 400-V-Bordnetz zu einer Verdoppelung der Steigungen der Strom- und Spannungstransienten und damit auch der hochfrequenten Störanteile sowie der Schirmspitzenströme.

Im niederfrequenten Bereich sind die Transienten in beiden Spannungslagen ähnlich; sehr hohe Transienten entstehen beim 800-V-Bordnetz hauptsächlich im Radiofrequenzbereich. Diese erhöhten Störanteile sind in der Hochvoltbordnetzauslegung im Rahmen der DIN-EN-55025-Konformität zu beachten [1].

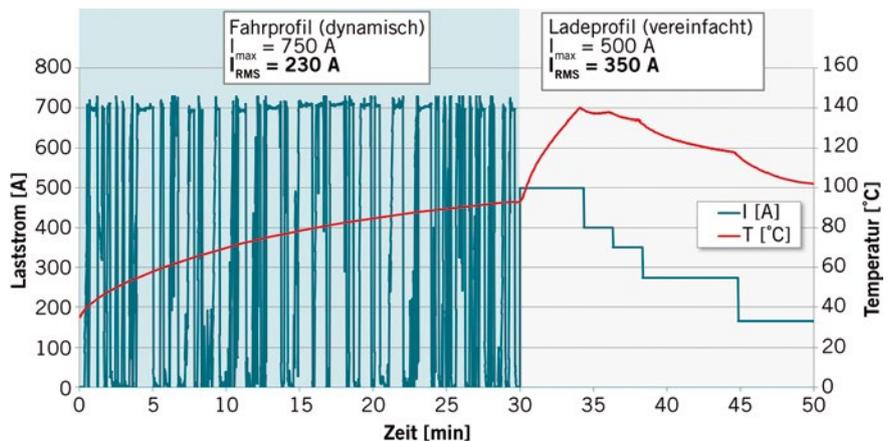


BILD 3 Stromprofil und Temperaturverlauf einer Komponente im Hauptstrompfad beim Fahren (links) und beim DC-Schnellladen (rechts) © Dräxlmaier

Prämissen:  Auslegung auf die gleiche Stromstärke (im 800-System wie im 400-V-System)  gleiche Querschnittsflächen der Leitungen			
Auslegungen	Grundlage der Auslegung	Änderungen von 400 auf 800 V	Trend
Temperatur	$\Delta\vartheta_{800V} = \Delta\vartheta_{400V} \cdot \left(\frac{400V}{800V}\right)^2 = \frac{1}{4} \Delta\vartheta_{400V}$	Bei doppelter Leistung gleiche Verluste, das heißt gleiche Erwärmung im Bordnetz (unverändert); bei variablem Strom entsteht ein Viertel des Erwärmungsanstiegs	
Geometrische Auslegungen: Luftstrecken Kriechstrecken Isolationswiderstände	Vorgabe (LV123, HV_2a vs. HV_3) Berechnung nach IEC 60664 LV 123: Hochvoltleitungssätze	Die Mindestluftstrecken bleiben unverändert Im Allgemeinen Verdoppelung der Spezifikationsvorgaben für die Kriechstrecken und Isolationswiderstände	 
Werkstoffe: Hochvoltkomponenten und Hochvoltkontaktsysteme	LV 123, LV 126, LV 161, LV 214, LV 215, LV 216 ...	Durch Spezifikationen in der HV-Komponentenauslegung festgelegt: 400 = 800 V (unverändert)	
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	$\frac{di}{dt} = \frac{U_L}{L} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{U_{BN}}{L} \Rightarrow \frac{di_{800V}}{dt} = 2 \cdot \frac{di_{400V}}{dt}$	Verdoppelung der Steigungen der Stromtransienten und damit der hochfrequenten Störanteile	
Lichtbogeneffekt: Lichtbogenlänge Maximale Leistungsabgabe	Berechnung nach [2] bei 30 mΩ Kurzschluss-Schleifenimpedanz	Lichtbogenlöschung beim Trennungsvorgang: Verdoppelung der Lichtbogenlänge Leistungsabgabe von max. 1,2 auf max. 5,0 MW	

BILD 4 Von 400 auf 800 V: Zusammenfassung der physikalischen sowie normativen Änderungen (© Dräxlmaier)

VERSTÄRKTER LICHTBOGENEFFEKT

Die anspruchsvollste konstruktive Herausforderung, die sich aus der höheren Spannungslage für die Bordnetzkonzeption ergibt, ist die stärkere Belastung der Komponenten durch den Lichtbogeneffekt. Dieser tritt zwar bereits ab 17 V in Erscheinung, allerdings steigen die Energiemengen – und damit die potenziellen Auswirkungen – mit höherer Spannung an. Insbesondere bei Schalt- und Trennvorgängen muss daher für eine zuverlässige Lichtbogenlöschung gesorgt werden.

Die errechnete maximale Lichtbogenlänge im Medium Luft verdoppelt sich beim Vergleich von Bordnetzen mit 400- und 800-V-Technik von 210 auf bis zu 420 mm. Sandfüllungen in Sicherungen oder Gel in Pyro-Trennelementen helfen in der Praxis dabei, die Lichtbogenlänge konstruktiv zu reduzieren.

Während in 400-V-Netzen bei Trennvorgängen bereits Leistungsabgaben von bis zu 1,2 MW auftreten können, vervielfacht sich der Wert in 800-V-Systemen auf bis zu 5 MW – jeweils bei einer Kurzschluss-Schleifenimpedanz von 30 mΩ. Daher ist es bei 800-V-Bordnetzen besonders wichtig, stets das gesamte System abzusichern [2]. Um dies zu erreichen, müssen Sicherungen, Steckverbinder und Schaltboxen nach neuen Vorgaben konstruiert und eingesetzt werden.

In **BILD 4** werden die nötigen Veränderungen beim Wechsel der Spannungs-

ebene von 400 auf 800 V noch einmal zusammengefasst.

VORTEILE DER HOHEN SPANNUNGS-LAGE NUTZEN

Im Zusammenspiel mit entsprechenden Schnellladepunkten können beim Einsatz eines 800-V-Bordnetzes die nötigen Wartezeiten bis zur 80%igen Aufladung des Fahrzeugakkumulators deutlich reduziert werden. Zugleich gestaltet sich die Auslegung der benötigten Hochvoltkomponenten im Vergleich zu einem 400-V-Bordnetz zum Teil sehr anspruchsvoll.

Durch die geforderten Spezifikationen verdoppeln sich generell die Kriechstrecken und Isolationswiderstände, während die Luftstrecken und die zu verwendenden Werkstoffe nahezu unverändert bleiben. Weiterhin muss eine geeignete konstruktive Auslegung die steigenden Anforderungen hinsichtlich des komplexen Thermomanagements sicherstellen. Durch die Verdoppelung des Spannungsniveaus verdoppeln sich zudem die elektromagnetischen Feldausbreitungen im Hochvoltbordnetz, insbesondere in den höheren Frequenzbereichen. Auch bestehen durch das erhöhte Lichtbogen-Schädigungspotenzial erhöhte Anforderungen beim Einsatz von Trennelementen und Sicherungen. Dabei werden derzeit in der Automobilindustrie oftmals noch Komponenten wie Schütze, Relais oder Sicherungen aus der Industrie verwendet.

Insbesondere für Hochvoltbordnetze mit hohen Stromlasten und Impulsen sind robuste Stecker beziehungsweise Stecksysteme erforderlich. Durch die Verwendung von Flachstecksystemen mit hoher Spannungs- und Stromtragfähigkeit, beispielsweise der von Dräxlmaier entwickelten dHPT-Familie, können Klasse-5-Hochvolt-Schnellladestecksysteme für Anwendungen mit Gleichstrom bis zu 1000 V und 500 A realisiert werden.

WOHIN GEHT DER TREND?

Entsprechend des rasant wachsenden Elektromobilitätmarktes werden auch der Einsatz von Hochvoltbordnetzen stark zunehmen. Zudem sind stetig steigende Batterieleistungen und reduzierte Ladezeiten zu erwarten, sodass die Leistungsfähigkeit des Bordnetzes weiterhin eine entscheidende Rolle spielen wird. Dabei wird ein starker Fokus auf dem Thermomanagement sowie der elektromagnetischen Verträglichkeit aller Komponenten liegen.

LITERATURHINWEISE

[1] DIN EN 55025: Fahrzeuge, Boote und von Verbrennungsmotoren angetriebene Geräte – Funkstörereigenschaften – Grenzwerte und Messverfahren für den Schutz von an Bord befindlichen Empfängern. Berlin: Beuth Verlag, März 2009

[2] Wortberg, M.: Lichtbogenproblematik in Energiebordnetzen. 8. Internationaler VDI-Kongress ELIV MarketPlace, Baden Baden, 2018



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelectronics-worldwide.com