

Whitepaper

Mit neuen Energiebordnetzen in die Zukunft der Mobilität

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----|
| 01 | Überblick | 02 |
| 02 | Einleitung | 03 |
| 03 | Sichere Trennschalter schützen kritische Lasten | 04 |
| 04 | Verkleinerung, Alternativen und Entfall von Niederspannungsbatterien | 07 |
| 05 | Vereinfachung von Energiebordnetzanalysen mit VDA 450 | 12 |
| 06 | 48 Volt im Niederspannungsbordnetz | 14 |
| 07 | Zuverlässigkeitsbewertungen und Sicherheitsanalysen mit Simulationen | 17 |
| 08 | Zusammenfassung und Fazit | 19 |
| | Referenzen | 20 |
| | Warum Bosch? | 21 |

01

Überblick

Automobile Megatrends wie das softwaredefinierte Fahrzeug treiben die Weiterentwicklung der technischen Infrastruktur von Fahrzeugen voran. Neue zuverlässige und sichere Stromversorgungslösungen sind die Basis für einen höheren Automatisierungsgrad des Fahrens und die Einführung neuer Technologieplattformen, z. B. für X-by-Wire-Systeme. Sie bedienen auch den steigenden Energiebedarf von Subsystemen für das automatisierte Fahren, Fahrerassistenz und Infotainment.

Dabei bietet der Übergang zu rein elektrischen E/E-Architekturen neue Möglichkeiten für kosteneffiziente Architekturen, indem die nun allgegenwärtige Hochspannungsstromversorgung besser genutzt wird.

Bei der Umgestaltung des Fahrzeugbordnetzes für die Mobilität der Zukunft sind zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen. In diesem Whitepaper konzentrieren wir uns auf vier von ihnen:

Sichere Stromversorgungen

Wir betrachten die jüngsten Fortschritte bei sicheren Stromversorgungslösungen und deren Designüberlegungen, wie sie aus der Norm ISO 26262 (ISO, 2018) abgeleitet und durch die VDA-Empfehlung 450 (VDA, 2023) weiterkonkretisiert wurden.

Umstieg von 12 V auf 48 V

Wir fassen die Vorteile und potenziellen Fallstricke der Einführung von 48 Volt als zusätzliche Spannungsebene in Fahrzeugsystemen zusammen.

Zukunft der Niederspannungsbordnetze

Wir geben einen Überblick über sichere Stromversorgung und welche Auswirkungen zukünftige Trends bei Elektrofahrzeugen auf LV-Batterien haben und umgekehrt.

Simulationsbasierter Systementwurf

Wir diskutieren und zeigen Beispiele, die die zentrale Rolle von Simulationen für praktische Systementwürfe in diesen zunehmend komplexen Umgebungen aufzeigen.

02

Einleitung

Jahrzehntelang haben Ingenieure das Design von Energiebordnetzen optimiert, um die Verfügbarkeit der Stromversorgung auch unter rauen Umweltbedingungen sicherzustellen und die Gesamtsystemkosten zu senken. Diese Entwürfe wurden in jüngerer Zeit im Hinblick auf Effizienzgewinne mittels neuer Designoptionen in relevanten Teilsystemen wie Start-Stopp und rekuperatives Bremsen erweitert. Gleichzeitig wurden mehrere Standardmuster für sicherheitsrelevante Bordnetze abgeleitet. In konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren werden die sicherheitskritischen und unfallrelevanten Teile des Systems oft durch lokale Reservelösungen wie Pufferbatterien oder durch den Einsatz alternativer Mittel (z. B. eine hydraulische Rückfallebene für Bremsen) verfügbar gehalten. Diese ursprünglichen Entwürfe wurden zunächst weitgehend unverändert in batterieelektrische Fahrzeugarchitekturen übernommen.

Innovative Funktionen fordern die Energieversorgung heraus

Die oben genannten Lösungen stoßen jedoch zunehmend an ihre Grenzen. Insbesondere neue innovative Funktionen mit erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit der Stromversorgung, z. B. Steer-by-Wire und Brake-by-Wire, lassen sich nicht wirtschaftlich integrieren. Darüber hinaus genügen herkömmliche Energiebordnetzarchitekturen ggf. nicht den hohen sicherheitsrelevanten Verfügbarkeitsanforderungen, bei denen ein Ausfall der Stromversorgung für kritische Funktionen, die ausschließlich von einer elektrischen Energieversorgung abhängen, nicht akzeptabel ist.

Vom Hauptverursacher von Liegenbleibern zur Säule für Verfügbarkeit

Auch jenseits der Sicherheitsanforderungen ist das Energiebordnetz seit jeher ein kritisches Konstruktionselement der Fahrzeug-E/E-Architektur, denn mehr als 50 % aller Fahrzeugpannen sind auf Ausfälle des Energiebordnetzes zurückzuführen, davon über 40 % auf eine defekte Niederspannungsbatterie (ADAC, 2021). Mit der zunehmenden Anzahl elektrischer Komponenten im Fahrzeug hat sich dieser Anteil weiter erhöht. Eine zuverlässige Versorgung ist daher von entscheidender Bedeutung für die wahrgenommene Gesamtproduktqualität und Zuverlässigkeit eines Fahrzeugs. Sicherheit und Qualität müssen hier also Hand in Hand gehen, wenn es darum geht, neue architektonische Lösungen für die Stromversorgung im Niederspannungsbereich zu definieren.

03

Sichere Trennschalter schützen kritische Lasten

Herkömmliche (Schmelz-)Sicherungen dienen in erster Linie dazu, den Kabelbaum vor Schäden zu schützen. Sie reagieren in der Regel aber nicht schnell genug, um Unterspannungen in anderen Bauteilen vorzubeugen, was zu kritischen Spannungseinbrüchen bei sicherheitskritischen Komponenten führen kann. Deshalb führen Automobilhersteller nach und nach sichere

Halbleitertrennschalter ein, die unübertroffene Reaktionszeiten bei Fehlfunktionen und erweiterte Überwachungsmöglichkeiten bieten. In Anlehnung an die VDA-Empfehlung 450 (VDA, 2023) (siehe Abschnitt 5) werden sie in der Regel als „Aktives Trenn- und Verbindungselement“ (ATV) integriert.

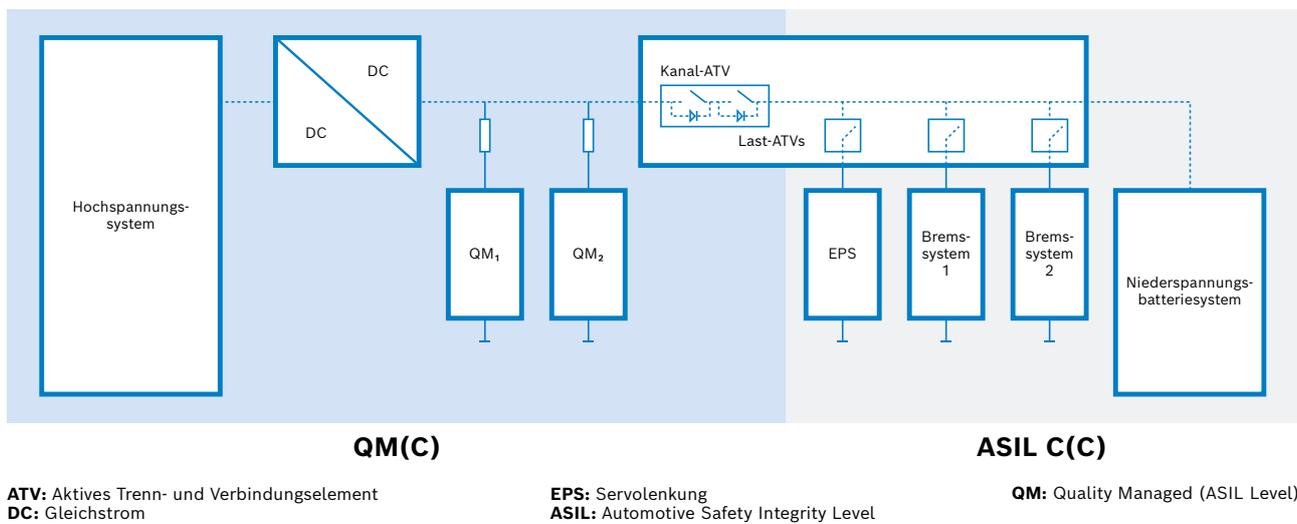


Abbildung 1: Aktive Trenn- und Verbindungselemente sorgen für eine zuverlässige Versorgung sicherheitskritischer Verbraucher.

Abbildung 1 zeigt das Konzept eines „Kanal-ATVs“ (ATV: Aktives Trenn- und Verbindungselement) am Beispiel eines Stromversorgungssystems für Lenk- und Bremslasten mit sicherheitstechnischen Verfügbarkeitsanforderungen bis ASIL-C. Der linke QM(C)-Versorgungskanal treibt alle Niederspannungsverbraucher von einem DC/DC-Wandler über das Hochspannungssystem an. Im Normalbetrieb bleiben die Schalter geschlossen und die

Energie fließt durch das ATV in Richtung der Sicherheitslasten. Im Falle einer Fehlfunktion einer QM-Last, z. B. bei einem Kurzschluss gegen Masse, schaltet das ATV diesen Kanal ab. Nach der Trennung wird die Energie für die Sicherheitslasten ausschließlich von einer Niederspannungsbatterie bereitgestellt. Um die Verfügbarkeit dieses Sicherungspfades zu gewährleisten, wird die Batterie ständig auf Alterung, Ladezustand und andere potenzielle

Leistungsprobleme überwacht. Die Sicherheitslasten werden darüber hinaus durch einzelne ATVs geschützt.

Heutzutage wird das ATV vorzugsweise nicht eigenständig implementiert, sondern in ein hochentwickeltes Stromverteilungsgerät integriert. Wie am Beispiel des Bosch Powernet Guardian (Bosch, 2023) erkennbar, können die Hersteller so die

Stromversorgungspfade des Fahrzeugs während seiner gesamten Lebensdauer ganzheitlich verwalten und die Diagnostizierbarkeit verbessern. In Tabelle 1 geben wir einen groben Überblick über die Merkmale eines solchen integrierten Geräts, das eine granulare Kontrolle über die Energieflüsse zu Subsystemen und Lasten ermöglicht.

| | |
|--|---|
| Sichere Versorgung | Fehlervermeidungs- und Fehlertoleranzmaßnahmen zur Sicherstellung der Stromversorgung der angeschlossenen Verbraucher |
| Sichere Abschaltung für Selbstschutz und Kurzschlussisolierung | Überstrom- und Übertemperatur-Selbstschutz, wenn die Last bestimmte Strom-Zeit-Schwellenwerte überschreitet Überstromabschaltung zur Isolierung von Kurzschlüssen Lastabwurf für Überlastsituationen und Fehlerbehandlung |
| Sichere Trennung bei Unter-/Überspannung | Spannungs-Zeit-Schwellenwerte zur Gewährleistung einer stabilen Energieversorgung |
| Schnelles Wiederverbinden | Schnelles Wiedereinschalten des Pfades nach einer präventiven Abschaltung aufgrund von Überhitzungsgefahr durch Rückströme |
| Ruhezustand | Kontinuierliche Stromversorgung mit minimalem Ruhestromverbrauch Schnelles Aufwachen ausgelöst durch Laststromzunahme |
| Vorladung der angeschlossenen Last oder des Stromversorgungskanals | Strombegrenzte Aufladung von Lastabzweigen und des gesamten Stromnetzes |
| Schutz des Kabelbaums | Unterbrechung der Lastpfade zur Vermeidung einer Überhitzung des Kabelbaums |
| Diagnose des Kabelbaums | Überwachung des Leitungswiderstands |
| Ausgangskontrolle | Externe Steuerungsmöglichkeit zum Öffnen/Schließen von Lastausgängen |
| Verpolungsschutz | Abschaltung von verpolten Batterieeingängen |
| Diagnosedienste | Zugang zu Betriebsinformationen, Diagnose und Kalibrierung für Diagnosetester |
| Parameterspeicherung und -anpassung | Kalibrierungs- und Überwachungsschnittstelle für die Entwicklung |

Tabelle 1: Auszug aus dem Funktionsumfang eines Stromverteilungsgeräts wie dem Bosch Powernet Guardian.

Die attraktiven Funktionen intelligenter Stromverteiler fördern deren Übernahme in gängige E/E-Architekturen. Mit der Einführung neuer, zentralisierter Fahrzeugarchitekturen bewegen sich die Automobilhersteller in Richtung rein elektronischer Schaltlösungen, siehe Abbildung 2. Mit wenigen, leistungsfähigen Fahrzeugcomputern und einer zonalen Zwischenschicht für die Unterverteilung sind Stromverteiler kommerziell attraktiv geworden. Um die Gesamtsystemkosten zu optimieren, sind einige Automobilhersteller noch nicht vollständig auf elektronische Sicherungen

umgestiegen, sondern sichern einige Lasten, die geringere Anforderungen an die Funktionen stellen, über Schmelzsicherungen ab. Wir gehen jedoch davon aus, dass sich der Trend zur vorrangigen Verwendung elektronischer Sicherungen mit der weiteren Konsolidierung in den gesamten E/E-Architekturen fortsetzen wird. Neben der besseren Beherrschbarkeit bietet dies auch die Möglichkeit, Energiebordnetzelemente in nicht zugängliche Einbauräume zu verlegen oder einen zentralen Kanal-ATV durch individuell überwachte Lastpfade zu ersetzen.

Energiebordnetzkonzept

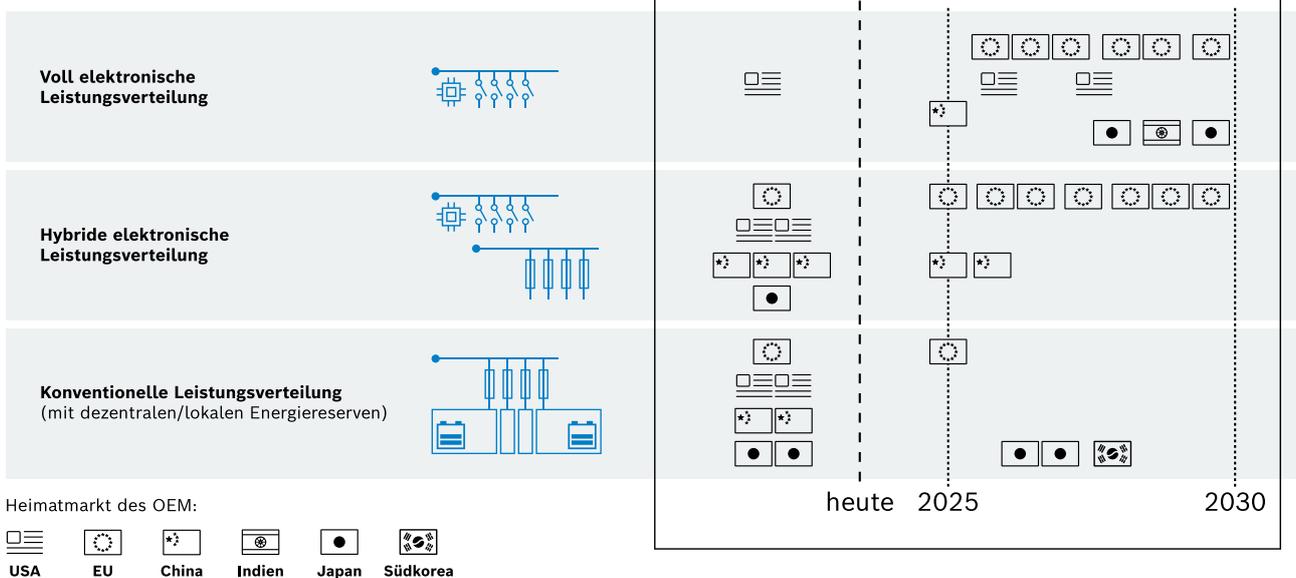


Abbildung 2: Es ist ein allgemeiner Trend, mehr Intelligenz in das Versorgungsnetz zu bringen.

04 Verkleinerung, Alternativen und Entfall von Niederspannungsbatterien

Steer-by-Wire- und Brake-by-Wire-Systeme ersetzen nach und nach den mechanisch-hydraulischen Durchgriff vom Fahrer zur Lenkachse und Bremse durch vollelektronische Lösungen. Dies stellt hohe Sicherheits- und Ausfallsicherheitsanforderungen an das Energiebordnetz, da Ausfälle nicht durch nicht-elektrische Kraftübertragung kompensiert werden können. Außerdem erwarten die Endkunden die gleiche Gesamtverfügbarkeit wie bei konventionellen Systemen. In solchen Konstellationen muss die sicherheitstechnische und nicht sicherheitstechnische Verfügbarkeit im Energiebordnetz gewährleistet werden, in der Regel durch die Einführung von mehr Redundanz. Darüber hinaus schränken relevante technische Empfehlungen und Normen sowie gesetzliche Anforderungen den Lösungsraum solcher Architekturen zusätzlich ein.

In Systemen wie dem in Abbildung 3 gezeigten erfüllt der Stromversorgungspfad Sicherheitsziele bis ASIL-D. Die Implementierung dekomponiert dies in der Regel in Anforderungen für einzelne und unabhängige Versorgungspfade zu den kritischen Verbrauchern, z. B. zum Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) und zum By-Wire-Aktuator (BWA). Dieser Ansatz wird generisch verfolgt, d. h. er ist auch auf andere Fahrzeugsysteme mit hochverfügbarem Versorgungsbedarf anwendbar.

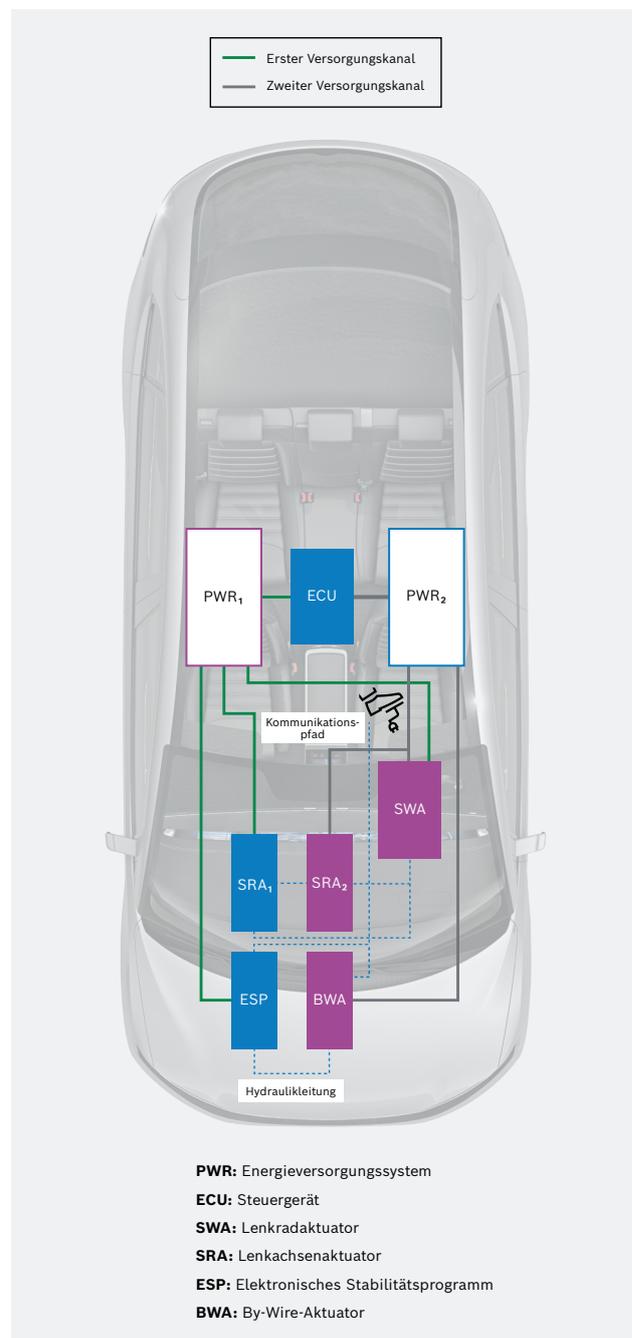


Abbildung 3: Steer- und Brake-by-Wire-System mit redundanten Versorgungspfaden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, solche Pfade mit der entsprechenden ASIL-Einstufung und gegenseitiger Unabhängigkeit zu schaffen. Die einfachste Lösung ist die Duplizierung der Energiereserven und aktiven Quellen, einschließlich des Stromverteilers. Eine nachträgliche Verkleinerung der Batteriekapazität und manchmal auch die Entfernung von Batteriequellen

ist oft ein Optimierungsziel, um die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs zu verbessern (Batterieausfälle sind ein häufiger Grund für Pannen, siehe oben) und können das Fahrzeuggewicht, die Kosten und den Wartungsbedarf reduzieren. Wir konzentrieren uns im Weiteren auf diese Optimierungsmöglichkeiten.

4.1 Umstellung von Niederspannungs-Blei-Säure- auf Lithium-Ionen-Batterien und Verkleinerung ihrer Kapazität

Die 12-V-Blei-Säure-Batterie ist seit vielen Jahren das Arbeitspferd des Niederspannungsbordnetzes. Sie wird für viele Zwecke eingesetzt, z. B. zum Starten des Motors eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, zur Ruhestromversorgung und als Pufferelement in Kombination mit dem Generator. Obwohl die Blei-Säure-Batterie aufgrund von Ladezyklen und Teilladungen alterungsanfällig ist (manchmal auch durch mechanische Fehler und Wasserverlust), ist sie im Betrieb sehr robust, z. B. in Bezug auf ihre Toleranz gegenüber Überspannungsspitzen, das Laden bei niedrigen Temperaturen usw. Darüber hinaus ist sie eine sehr kostengünstige Lösung. Angesichts von (geplanten) Umweltregulierungen und anderer nachteiliger Eigenschaften wie dem hohen Gewicht, der hohen Ausfallrate und der begrenzten Lebensdauer von nur wenigen Jahren besteht jedoch allgemein der Wunsch, Blei-Säure-Batterien in Zukunft durch Lithium-Ionen-Batterien zu ersetzen. Während Blei-Säure-Batterien nur in einem Bereich zwischen 50 und 100 Prozent Ladezustand verwendet werden können, sind Lithium-Ionen-Batterien fast über den gesamten

Kapazitätsbereich einsetzbar. Diese Tatsache sowie andere vorteilhafte Faktoren (z. B. ein geringerer Innenwiderstand) ermöglichen eine erhebliche Verringerung der Gesamtkapazität dieser Batterien im Vergleich zu ihren Blei-Säure-Pendants. So speichern 12-V-Blei-Säure-Batterien in Elektrofahrzeugen in der Regel etwa 30 – 60 Ah, während 12-V-Lithium-Ionen-Batterien sogar auf unter 10 Ah verkleinert werden können. Auf der Ebene der Zellchemie haben Lithium-Eisenphosphat-(LFP)- und Nickel-Mangan-Kobalt-(NMC)-Zellen, die als 4 Einzelzellen in Reihe (4s1p) konfiguriert sind, derzeit das Potenzial, die typische 12-V-Implementierung zu werden. Solche Batterien sind in der Regel mit einem eigenen Batteriemanagementsystem (BMS) ausgestattet, das die Überwachung der Zellen und einen Halbleiter-Batterie Hauptschalter umfasst.

Lithium-Ionen-Batterien stellen jedoch neue Anforderungen an das Design des Energiebordnetzes. Am Beispiel einer NMC-basierenden Batterie in 4s1p-Zellenkonfiguration erhöht sich die nominale Betriebsspannung von ca. 12,5 V auf 14 – 15,5 V für den offenen

Stromkreis und von 14 – 15 V auf 15 – 17 V für die Ladespannung. Andere Systemkomponenten müssen daher angepasst werden. Darüber hinaus muss aufgrund der geringeren Batteriekapazität der Ruhestrom im geparkten Zustand des Fahrzeugs reduziert werden oder es entsteht ein Nachladebedarf aus der Hochvoltbatterie während des Parkens. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die Energienetzarchitektur, sondern auch auf die Funktionszuordnung und die Kommunikationsnetzarchitektur, z. B. hinsichtlich der Nutzung von Teilnetzbetrieben. Darüber hinaus verringert sich die Fähigkeit, hohe Stromspitzen bereitzustellen und zu puffern, und in einigen

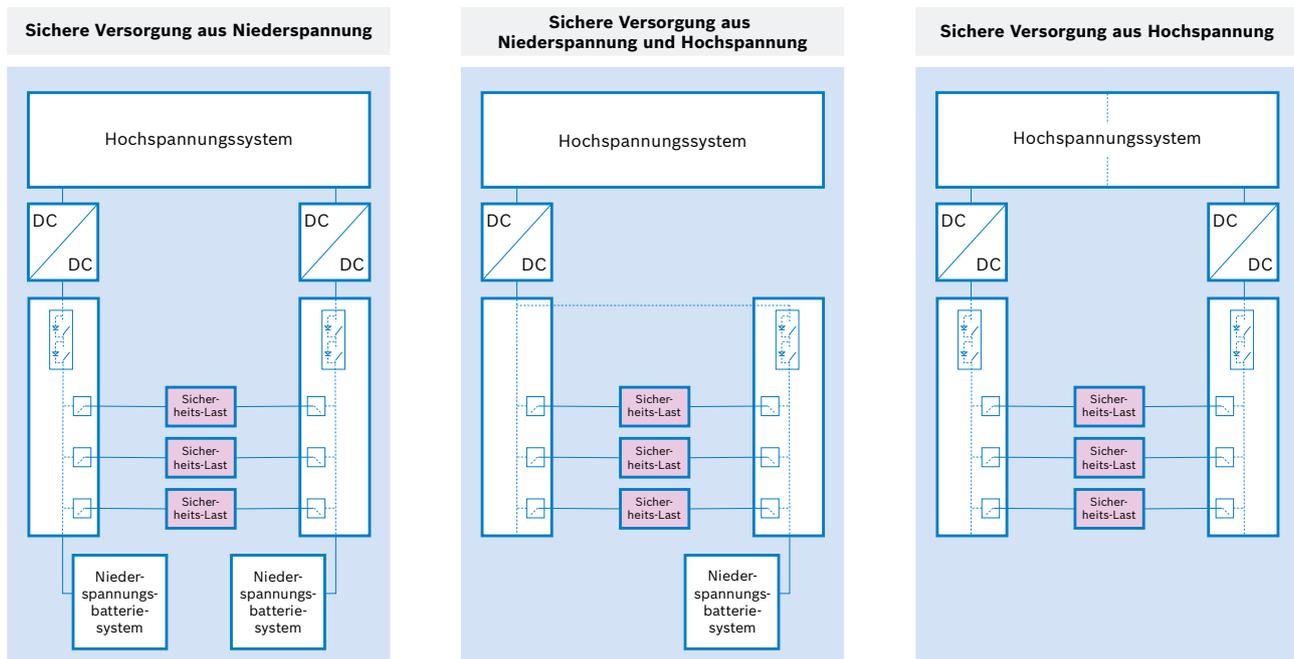
Fällen müssen die Spannungswandler so angepasst werden, dass sie höhere Spitzenströme aufnehmen können. Als Alternative können Kondensatoren zur Unterstützung der Spannungswandler eingesetzt werden. Der Übergang zu Lithium-Ionen-Batterien ist also kein „Drop-in-Ersatz“.

4.2 Sichere Versorgung aus der HV-Batterie und Entfall von LV-Batterien

Wie bereits erwähnt, ist die Niederspannungsbatterie immer noch die Hauptursache für Fahrzeugpannen, selbst bei modernen Fahrzeugen. Die Einführung vollelektrischer Fahrzeugplattformen bietet jedoch die Möglichkeit, auf die Niederspannungsbatterien vollständig zu verzichten und sich ganz auf die Hochspannungsbatterie zu stützen. Wie erwartet, besteht ein großes Interesse an der Erforschung dieses Weges.

Nach unseren derzeitigen Erkenntnissen wird bei redundanten zweikanaligen Netzarchitekturen, die für Hochverfügbarkeits-szenarien benötigt werden, in einem ersten Schritt die Niederspannungsbatterie aus einem der beiden Kanäle entfernt, wie in Abbildung 4, mittlere Option, dargestellt. In diesem Fall wird der Kanal ohne Niederspannungsbatterie über einen separaten Spannungswandler von der Hochspannungsbatterie versorgt. Alle während des Parkens benötigten Verbraucher werden vorzugsweise in den Kanal verlegt, der in

dieser Konfiguration noch von einer Niederspannungsbatterie versorgt wird. Doch selbst dieser erste Schritt erfordert einige Änderungen am Hochspannungsnetz und an dem Spannungswandler für diesen Kanal. In der Regel hat jeder der beiden Niederspannungskanäle eine ASIL B(D)-Einstufung für seine Verfügbarkeitsanforderung. Das bedeutet, dass die Hochspannungsbatterie, der Spannungswandler für diesen Kanal sowie die Hochspannungsstromverteilung ebenfalls mit ASIL B(D) bewertete Verfügbarkeitsanforderungen erhalten. Darüber hinaus müssen auch die funktionalen Anforderungen angepasst werden. So muss der Spannungswandler beispielsweise eine höhere Stromdynamik (bis zu 400 A/ms) unterstützen. Alternativ müssen andere Maßnahmen zur Bewältigung von Stromrückkopplungen von Komponenten, wie z. B. Lenkungssystemen, implementiert werden. Auf der Hochspannungsseite müssen unbeabsichtigte Interferenzen zwischen QM-Nennlasten



QM-Lasten nicht dargestellt.

Abbildung 4: Optionen für eine sichere Versorgung mit verschiedenen Energiequellen/Reserven.

im Hochspannungsnetz und der Hochspannungsbatterie und dem Spannungswandler berücksichtigt und, falls erforderlich, verhindert werden. Darüber hinaus kann der ASIL B(D)-Spannungswandler direkt an die Hochspannungsbatterieklammern angeschlossen werden, d. h. vor dem Batterie Hauptschutzschalter. Dieser Spannungswandler kann technisch vorteilhaft in das Gehäuse der Hochspannungsbatterie integriert werden, um die Berührung von ungeschützten Hochspannungskabeln zu verhindern und die Anforderungen des Dauerbetriebs besser zu erfüllen.

Entfall der LV-Batterie in einem Bordnetzkanal

Eine radikalere Option ist der vollständige Verzicht auf alle Niederspannungsbatterien in beiden Kanälen (siehe Abbildung 4, rechte Option). Dies erfordert weitere umfangreiche Anpassungen. Beide Niederspannungskanäle geben ihre ASIL B(D)-Nennverfügbarkeitsanforderungen an die

Hochspannungsbatterieversorgung weiter. Das bedeutet, dass die Hochspannungsbatterie in einem reinen Hochspannungssystemscenario eine ASIL D-Einstufung erhalten würde. Es ist realistisch, davon auszugehen, dass das Hochspannungsnetz stattdessen in zwei redundante Hochspannungspfade mit zwei Batteriepaketen, separater Hochspannungsstromverteilung und separaten Spannungswandlern aufgeteilt wird. Natürlich müssen abhängige Ausfälle zwischen den beiden Hochspannungspfaden sowie systematische Ausfälle verhindert werden.

Kompletter Entfall aller LV-Batterien

Eine zusätzliche Herausforderung sind Stromspitzen, die bei batterielosen Niederspannungsstrecken auf andere Weise bewältigt werden müssen. Die Spannungswandler müssen so ausgelegt sein, dass sie den gesamten Leistungs- und Strombedarf, einschließlich aller Spitzen, abdecken. Die Einführung von Kondensatoren in das Niederspannungsnetz zur Unterstützung der Spannungswandler kann eine optionale Maßnahme zur Glättung des Spannungsniveaus sein, allerdings ohne die Möglichkeit, große Mengen an Energie zu speichern. Außerdem muss der Ruhestrom beim Parken über Spannungswandler bereitgestellt werden. Da große Hauptspannungswandler im Allgemeinen einen geringen Wirkungsgrad bei niedriger Ausgangsleistung haben, ist es wahrscheinlich effektiver, einen oder zwei zusätzliche Spannungswandler mit geringer Leistung für die Ruhestromversorgung einzusetzen.

Abschließend ist zu sagen, dass alle Vorteile dieser radikalen Option (Kosteneinsparungen bei den Komponenten, Gewichts- und Platzeinsparungen, verbesserte Fahrzeugverfügbarkeit) sorgfältig mit den Kosten für ein verbessertes Hochspannungsnetz verglichen werden müssen. Nichtsdestotrotz kann sie für Fahrzeugplattformen attraktiv sein, die im Allgemeinen ein redundantes zweikanaliges Niederspannungsnetz benötigen (rein autonome Fahrzeuge, „By-Wire“-Lösungen mit hohen Take-Rates usw.) und die eine Hochspannungsbatterie enthalten, die in zwei separate Module aufgeteilt ist, z. B. mit 2 x 400-V-Batteriepacks für 800-V-Fahrzeuge.

05

Vereinfachung von Energiebordnetzanalysen mit VDA 450

Die Entwicklung von Sicherheitskonzepten für das Stromversorgungssystem verlief in der Vergangenheit inhomogen. Sicherheitsstandards wie die Norm ISO 26262 wurden sehr unterschiedlich auf das Stromversorgungssystem angewandt, was zu einer großen Varianz in der Qualität, Verfügbarkeit und Sicherheit von Stromversorgungssystemen führte.

Mit dem Aufkommen von Steer-by-Wire- und Brake-by-Wire-Funktionen sowie von automatisierten Fahrfunktionen, die eine zuverlässige, ausfallsichere Stromversorgung erfordern, hat die Entwicklung der Stromversorgungssysteme im Sicherheits-Engineering an Bedeutung gewonnen.

Der VDA hat den Klärungs- und Orientierungsbedarf erkannt und eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, deren Aufgabe es ist, eine gut abgestimmte Entwicklungsmethode für Stromversorgungssysteme bereitzustellen, die sowohl mit den Sicherheitsnormen (ISO 26262, 2. Auflage) als auch mit den gesetzlichen Anforderungen (z. B. UNECE R13(H), GB 21670 und FMVSS für das Bremsen, UNECE R79 und GB 17675 für die Lenkung, UNECE R157 für die automatische Spurhaltung) konform ist.

Die Konformität mit Sicherheitsnormen ist eine wichtige Eigenschaft des Stromversorgungssystems. Für einige Fahrzeugfunktionen ist die Einhaltung von ISO 26262 oder GB/T 34590 bereits für die Homologation erforderlich (z. B. für automatische

Spurhaltesysteme über UNECE R157, BEV-Antriebsbatterien über GB 38031-2020). Daher war die Einhaltung der ISO 26262 ein Kernelement für die VDA-Arbeitsgruppe.

Mit der 2. Ausgabe der ISO 26262 sind neue Optionen für die Item-Definition verfügbar geworden. Dazu gehören Items, die nur einen Teil einer Funktion auf Fahrzeugebene erfüllen. Die Arbeitsgruppe VDA 450 ist bei ihrer ersten Entwicklungsmethode davon ausgegangen, dass das Stromversorgungssystem als ein solches Item definiert wird. Dies bringt einige Vorteile mit sich. Zum Beispiel kann das Stromversorgungssystem so entwickelt werden, dass es seine eigenen Zielwerte für zufällige Hardwarefehler (PMHF, SPFM, LFM) erfüllt. Die Zielwerte für das Stromversorgungssystem sind in diesem Szenario unabhängig von anderen Funktionen wie Lenkung und Bremsen, was die Komplexität und die gegenseitigen Abhängigkeiten in der Entwicklungsphase erheblich reduziert.

Mit der Veröffentlichung der deutschen VDA-Empfehlung 450 für automatisierte Fahrfunktionen wird die Entwicklung entsprechender sicherer Stromversorgungssysteme erheblich erleichtert. Es wird erwartet, dass sie als Referenz für andere globale Normen und Implementierungen dienen wird. Die Empfehlung umfasst allgemeine Konstruktionsregeln für das Stromversorgungssystem und seine Elemente. Sie verwendet einen Top-Down-Ansatz, um die Anforderungen abzuleiten,

die gemäß den jeweiligen Normen erfüllt werden müssen. Die Empfehlung enthält Verbesserungen und bewährte Praktiken, z. B. für die Budgetierung, die Fehlerbehandlung, die Toleranzzeitintervalle für den Notbetrieb und eine neue und verbesserte Nomenklatur für Klemmen mit Sicherheitseigenschaften. Für Praktiker enthält sie außerdem umfangreiche Listen zur Überprüfung äußerer und innerer Bedingungen, die die Störungsfreiheit beeinträchtigen können.

Die VDA-Empfehlung 450 wurde von führenden Branchenexperten entwickelt, darunter viele Automobilhersteller und Zulieferer wie Bosch. Ihre Nützlichkeit für reale Energiebordnetz-Designs ist durch Anwendungsbeispiele in Referenztopologien belegt und kann auf Systeme jenseits des automatisierten Fahrens, wie die oben erwähnten X-by-Wire-Lösungen, ausgeweitet werden. Ihr Wert für zukünftige Architekturen ist daher unbestreitbar.

06

48 Volt im Niederspannungsbordnetz

Infotainment- und ADAS-Funktionen führen zu einem steigenden Strombedarf im Niederspannungsnetz. Mit mehr Rechenleistung, größeren Displays und Komfortfunktionen („Wohnraum auf Rädern“) sowie einer sicherheitsgerechten Energieversorgung für das automatisierte Fahren wird der durchschnittliche Stromverbrauch im Fahrzeug bis zum Ende des Jahrzehnts voraussichtlich 5 – 6 kW erreichen. Aufgrund der fortschreitenden Zentralisierung muss mehr Energie in weniger Steuergeräte übertragen werden, was zu größeren Leitungsquerschnitten und größeren Halbleiterschaltern führt, um die erforderlichen Ströme zu übertragen.

Aus Sicht der Energieverteilung ist es daher naheliegend, die Niederspannungsebene für die Stromversorgung anzuheben, um das Gesamtgewicht des Kabelbaums, den Aufwand und die Kosten für Halbleiterschalter zu reduzieren. Die jüngste Ankündigung von Tesla (Tesla, 2023), das Niederspannungsniveau auf 48 V zu vervierfachen, war daher zu erwarten. Angesichts der Tatsache, dass oberhalb von 60 V zusätzliche Anforderungen, wie z. B. zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen bei der Wartung für Fahrzeugteilsysteme ins Spiel kommen, ist dies die am einfachsten zu wählende Spannungsebene.

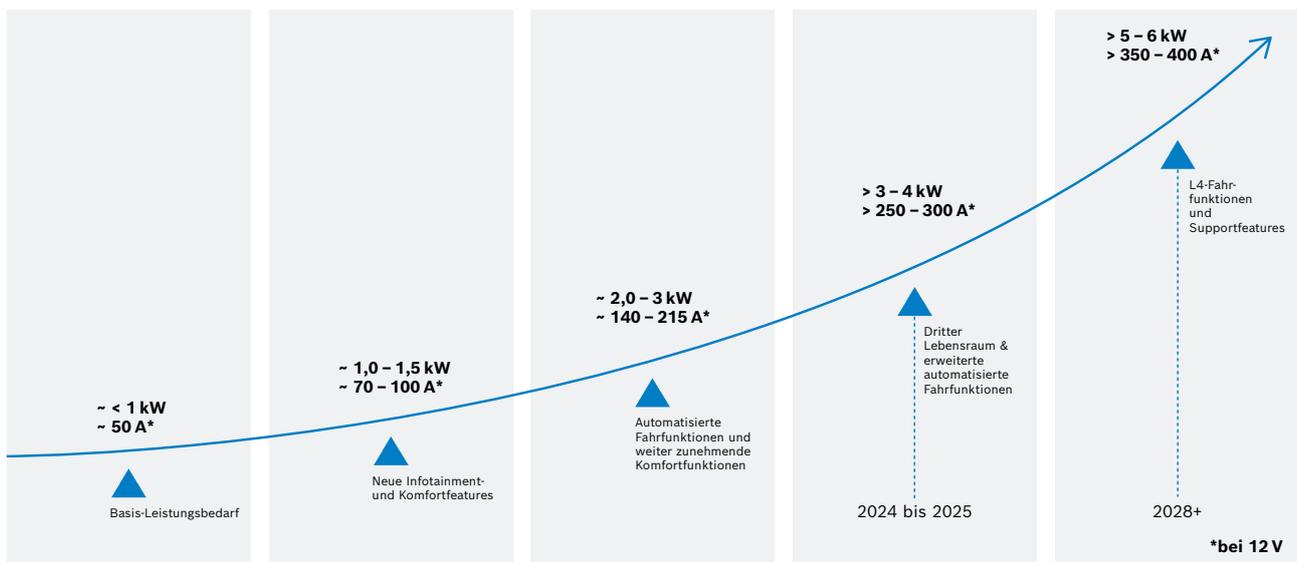


Abbildung 5: Entwicklung des Energiebedarfs in Niederspannungsbordnetzen

Die größte Herausforderung bei der Umstellung auf 48 V sind die erheblichen Altlasten in den derzeitigen Fahrzeugarchitekturen. 12 V ist seit den 1960er-Jahren die Hauptspannungsebene und daher sind praktisch alle Fahrzeugkomponenten dafür

optimiert. Es gibt nur wenige Ausnahmen, z. B. bei der Stromversorgung für Mild-Hybride und die aktive Federung, aber sie bilden derzeit nur eine kleine Insel innerhalb des gesamten Fahrzeugstromnetzes.

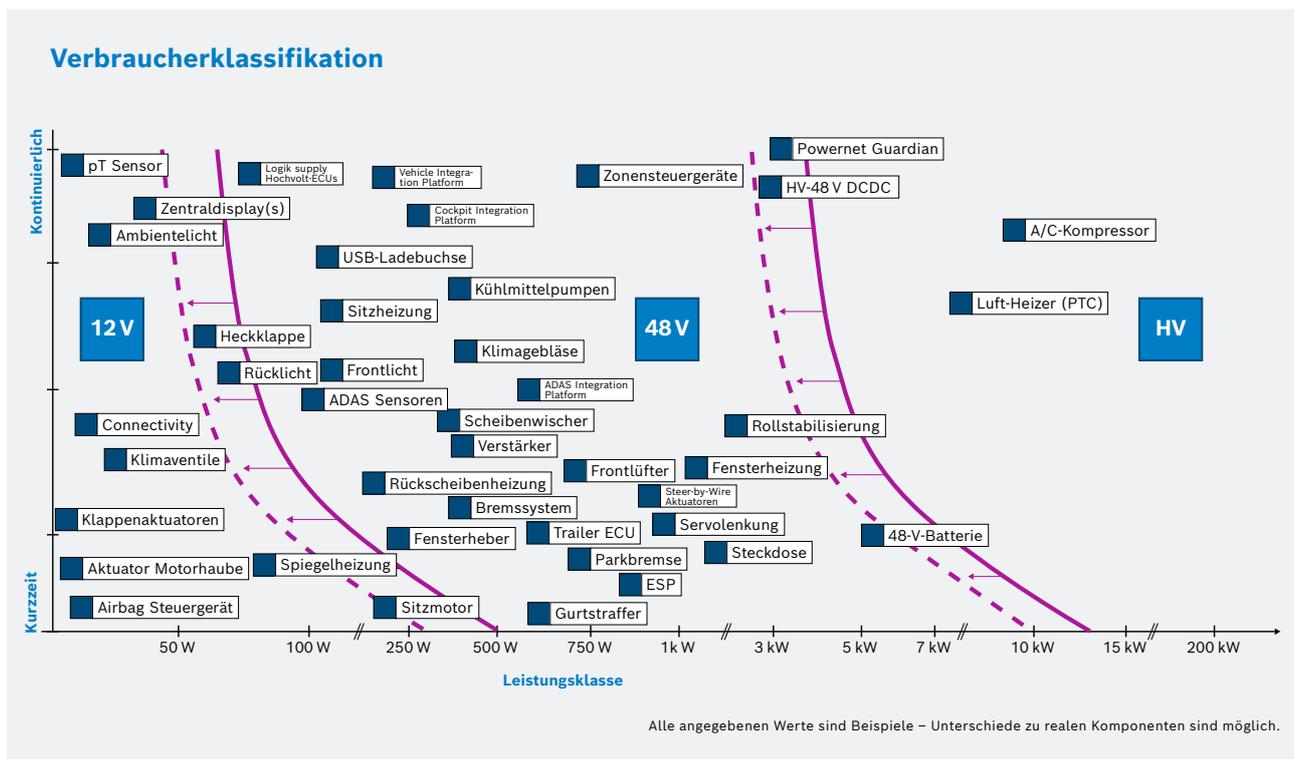


Abbildung 6: 48 V zielt darauf ab, einen „Sweet Spot“ zwischen der Umstellung von Lasten mit hohem Stromverbrauch auf HV und den geringeren marginalen Vorteilen einer Umstellung auf 48 V für Komponenten mit niedrigem Stromverbrauch zu finden. (Beispiel zur Veranschaulichung, muss in bestehenden Architekturen individuell bewertet werden.) Die Grenzen verschieben sich über die Zeit durch Technologie- und Kostenentwicklung (gestrichelte Linien).

Gemeinsam mit Tier-1-Zulieferern wie Bosch prüfen Automobilhersteller mögliche Migrationsszenarien sorgfältig und mit Fokus auf individuelle Lasten und Gesamtsystem-TCO. Wie bei Analysen von E/E-Architekturen üblich, gibt es jedoch keine Einheitslösung für alle. Aus unseren aktuellen Analysen geht hervor, dass die 48-V-Spannungsebene auf kurze Sicht die 12-V-Ebene nicht vollständig als neue Niederspannungsebene in Autos ersetzen wird, sondern für einige Komponenten eine dritte Option zwischen dem derzeitigen Standard von 12 V und der Hochspannung

werden kann. Während einige OEMs ganz bei 12 V oder einer höheren Spannung jenseits 16 V bleiben werden, werden andere eine schrittweise Umstellung auf 48 V vornehmen. Universelle, schnelle und umfassende Migrationen von 12 V auf 48 V sind noch in der Ausarbeitung. Da keine nativen 48-V-Bauteile verfügbar sind, ist mit einem Kostenanstieg zu rechnen, der zunächst nicht durch Kostensenkungen bei Kabelbäumen, Sicherungen und Effizienzsteigerungen kompensiert wird. Langfristig wird es trotz der sinkenden Kosten für 48-V-Bauteile wichtig sein, nach „Sweet Spots“

für 48-V-Komponenten zu suchen (siehe Abbildung 6), da die Verlagerung von Komponenten in das Hochspannungsnetz zu einer praktikablen Alternative werden könnte. Bei Lasten mit geringem Stromverbrauch sind die erzielbaren Gewinne in Bezug auf die Reduzierung der Kabelbaumkosten und die Effizienzgewinne geringer als die Mehrkosten der Komponenten für 48V. In solchen Fällen sind die Gesamtkosten des Systems ausschlaggebend für die Entscheidung, ob 48V lokal auf 12V für kleine Übernahmekomponenten umgewandelt oder diese Geräte auf 48V umgestellt werden sollen.

Die zusätzlichen Infrastrukturkosten, die durch die Einführung der zusätzlichen Spannungsebene entstehen, sind sehr unterschiedlich. Abhängig von der Anzahl der 48-V-Komponenten und der Verfügbarkeit einer Stromunterverteilungsebene (zonale Architektur) sind verschiedene Energiebordnetzarchitekturen besser geeignet, siehe Abbildung 7.

Für einige Referenzarchitekturen stellen wir fest, dass die Kostenvorteile von 48V durch eine geringere Gesamtzahl von Steuergeräten und eine stringente Implementierung einer zonalen Architektur mit Leistungsunterverteilung realisiert werden. Für eine Weiterentwicklung von anderen Architekturen müssen die Schwellenwerte für eine notwendige Änderung der Netzarchitektur sorgfältig ermittelt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass 48V kein einfacher Ersatz für die etablierten 12-V-Lösungen ist, sondern mit einer besseren Verfügbarkeit von Komponenten und der allgemeinen Weiterentwicklung von Energiebordnetz-Designs an kommerzieller Attraktivität gewinnen kann.

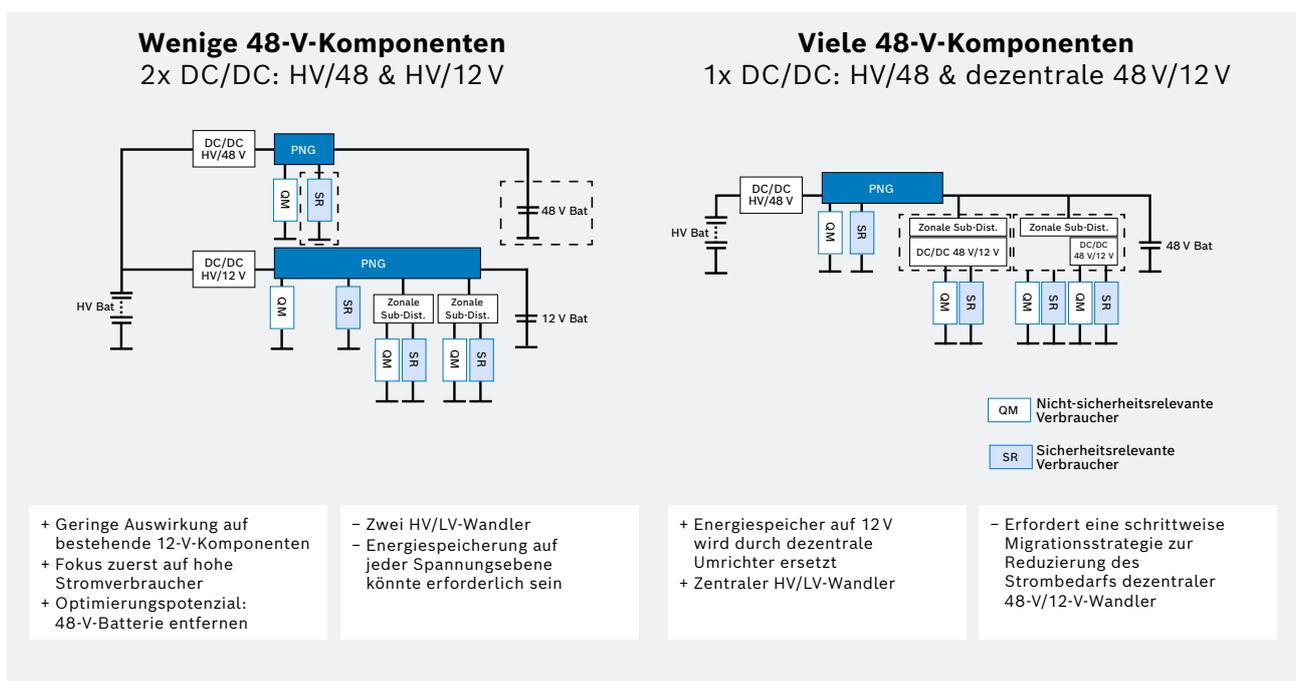


Abbildung 7: Die Anzahl der 48-V-Komponenten und die geplante Unterverteilungsstruktur bestimmen den Aufbau des dreistufigen Stromnetzes.

07

Zuverlässigkeitsbewertungen und Sicherheitsanalysen mit Simulationen

Neben der Verwendung für die Energiebordnetz- und Komponentenauslegung empfiehlt die ISO 26262 dringend die Durchführung von Simulationen, um die Abwesenheit von unverhältnismäßigen Risiken zu überprüfen (ISO, 2018). Analog zu physikalischen Fehlerinjektionstests kann eine Simulationsumgebung genutzt werden, um die korrekte Implementierung, Wirksamkeit und Leistung/Genauigkeit der erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen zu überprüfen.

Darüber hinaus ist in den letzten Jahren der Wert von Simulationen über Sicherheitsargumente hinaus weiter gestiegen, da die Komplexität von Netzentwürfen und die Variantenvielfalt zugenommen haben. Da ein physischer Aufbau von Testszenerarien für die Bewertung von Entwurfsalternativen und Fahrzeugvarianten leicht unerschwinglich teuer werden kann, werden stattdessen Simulationen eingesetzt, um ein frühes Feedback zu erhalten und eine hohe Testabdeckung auch bei einer großen Anzahl von Varianten zu erreichen.

Verschiedene Fragestellungen erfordern unterschiedliche Simulationsmethoden

In Abbildung 8 zeigen wir eine grundsätzliche Clusterung der Simulationsmethoden, die wir üblicherweise im Rahmen des Designs der Energiebordnetzarchitektur durchführen. Neben einfachen energetischen Simulationen (Versorgungskapazitäten, Energiereserven etc.) analysieren wir die Spannungsstabilität des Netzes in allen

möglichen Anwendungsfällen des Nennbetriebs sowie in verschiedenen Fehler-szenarien. Mit dem zunehmenden Einsatz von Hochgeschwindigkeitskommunikation, empfindlichen Fahrzeugcomputern und vielen hochfrequent geschalteten Leistungselektroniken in Fahrzeugen wird auch die Bewertung von transienten Effekten, Spannungswelligkeit und der Wechselwirkung zwischen Hoch- und Niederspannungsnetzen immer wichtiger. Wie bereits erwähnt, sind die Ergebnisse dieser Simulationen sehr nützlich für die Energiebordnetz- und Komponentenauslegung, z. B. zur Optimierung der Batteriedimensionierung. Darüber hinaus können Simulationen auch zur Verifizierung und Validierung des Netzdesigns und des funktionalen Sicherheitskonzepts, der Interaktion des physischen Netzes mit SW-Funktionen (z. B. Energiemanagement oder Diagnose) sowie für Zuverlässigkeitsanalysen verwendet werden. Da sich Simulationen leicht skalieren lassen, sind sie auch sehr nützlich für den Vergleich verschiedener Lösungen sowie für Parametervariationen, z. B. von Komponenteneigenschaften oder Umgebungsbedingungen (Temperatur, Einsatzprofile usw.).

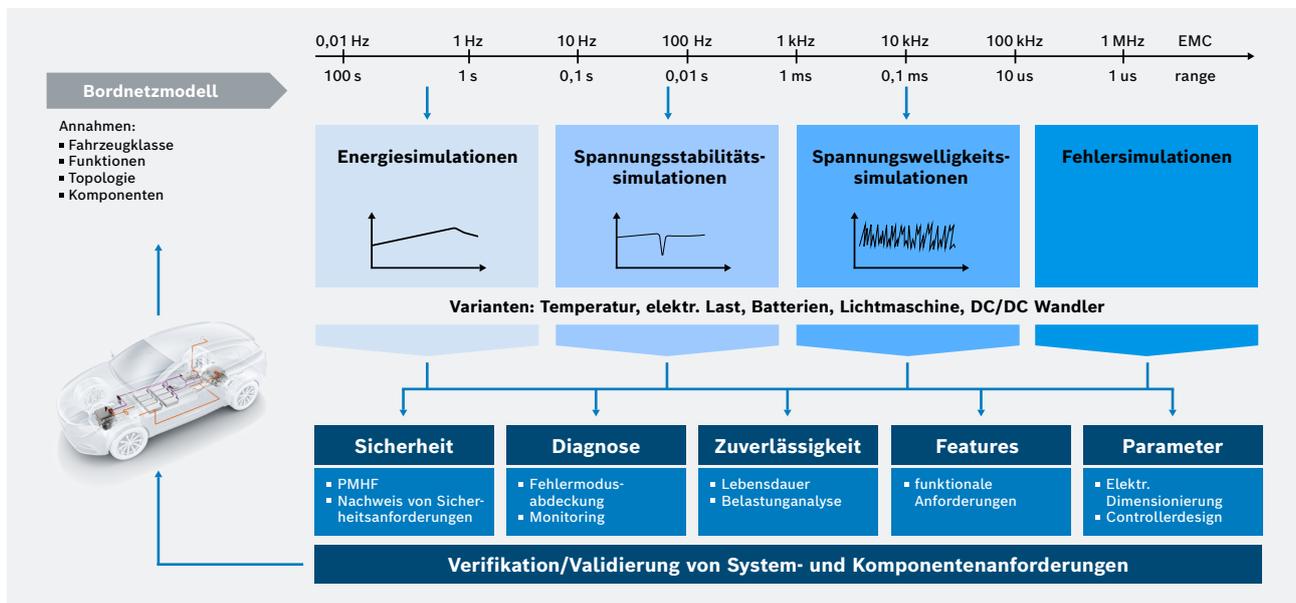


Abbildung 8: Simulationen unterstützen die Sicherheitsüberprüfung sowie Funktions- und Zuverlässigkeitsanalysen zur frühzeitigen Bewertung von Architekturentscheidungen.

Unterstützung einer DC/DC-Wandlerentwicklung durch Bordnetzsimulationen

Als einfaches Beispiel für eine typische Simulationsaufgabe zeigen wir in Abbildung 9 die Simulationsergebnisse und Messungen der Lastsprungantwort eines DC/DC-Wandlers. Das Ersatzschaltbild stellt das Impedanznetzwerk auf jeder Seite des Wandlers dar. Das Besondere an den Simulationen ist, dass wir auch in der Lage sind, Simulationen des physikalischen Netzes mit Simulationen von SW-Modellen in Co-Simulationen zu kombinieren und

z. B. die Auswirkungen von Latenzen in der SW-Logik und internen Schaltkreisen zu modellieren. In Kombination mit dem umfassenden Verständnis der funktionalen Anforderungen, über das Systemanbieter wie Bosch verfügen, ist dies ein einzigartiger Vorteil. Solche Informationen sind wertvoll für den Entwurf steuerungseinheitlicher Schaltkreise, für die Dimensionierung der Sicherheit- und anderer Reaktionsmechanismen. Dies kann auch auf verteilte Stromversorgungslösungen ausgeweitet werden, z. B. durch die Verwendung von Modellen für Kommunikationslatenzen zwischen den Verteilungsschichten.

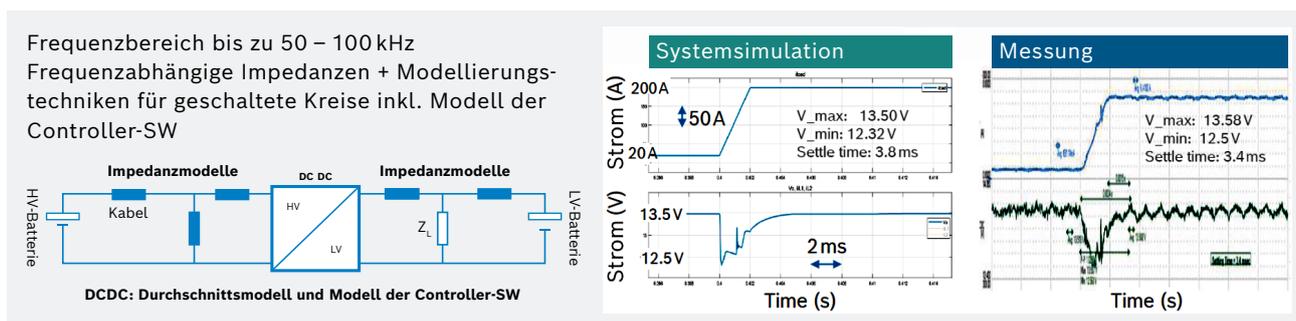


Abbildung 9: Die korrekte Systemsimulation (inkl. Software-Timings) einer beispielhaften Lastsprungantwort wird durch spätere manuelle Labormessungen bestätigt.

08

Zusammenfassung und Fazit

Neue spannende Funktionen in allen Fahrzeugbereichen erhöhen die Anforderungen an die Energiebordnetzarchitektur. Mit steigender Nachfrage nach sicheren und zuverlässigen elektrischen Versorgungslösungen ist es notwendig, das Design von Energiebordnetzarchitekturen deutlich voranzutreiben. In diesem Beitrag haben wir einen Überblick über einige der wichtigsten Themen gegeben, die Automobilhersteller und -zulieferer in den kommenden Jahren beschäftigen werden.

Neue Technologien wie eFuses und 48 V werden Energiebordnetze deutlich verändern

Der Übergang zu elektronischen Stromverteilungslösungen wie dem Powernet Guardian von Bosch wird es Herstellern ermöglichen, mehr sicherheitskritische Lasten für Funktionen wie X-by-Wire und autonomes Fahren in das Fahrzeug zu integrieren. Zonale Architekturen werden für eine bessere Platzierung der Leistungsinfrastruktur entscheidend sein und die Wartungsfreundlichkeit und Zuverlässigkeit insgesamt erhöhen. Mit der 2023 erschienenen VDA-Empfehlung 450 werden der Designprozess und die Umsetzung von sicheren Netzarchitekturen zunehmend standardisiert.

Die Einführung einer 48-V-Versorgungsebene kann das Gewicht des Kabelbaums reduzieren und die Effizienz für Hochleistungslasten im Niederspannungsbereich verbessern. Allerdings muss ein solcher Schritt sorgfältig geplant und in Kooperationen und Studien zwischen Herstellern und Zulieferern bewertet werden, um einen positiven System-TCO-Effekt zu erzielen.

Wie in der E/E-Architektur üblich, gibt es keine Einheitslösung – vor allem nicht, wenn es erhebliche Einschränkungen durch Altlasten gibt.

Bordnetzsimulationen helfen die neue Komplexität zu beherrschen

Simulationsfähigkeiten werden in Zukunft ein wichtiger Vorteil für die Entwickler von Stromnetzen sein. Mit ausgefeilten Modellierungsmöglichkeiten von Fehlern, transienten und externen Effekten ist es möglich, die anstehenden evolutionären und revolutionären Schritte in der Energiebordnetzarchitektur wirtschaftlich und mit schnellen Feedback-Schleifen zu bewerten. Dies erfordert die Erweiterung der Modellierungsumgebung, um zusätzlich die SW-Logik und Kommunikationspfade in solch komplexen Systemen abzubilden.

Gemeinsam Zukunft entwickeln

Insgesamt befinden wir uns in einer Phase des massiven Wandels in der Automobilbranche. Das gilt auch für die Entwicklung des Energiebordnetzes. Um zuverlässige, sichere und kosteneffiziente Fahrzeuge zu bauen, bedarf es einer engen Zusammenarbeit zwischen Fahrzeugherstellern und Zulieferern mit umfassender Systemkompetenz wie Bosch. Wir sind überzeugt, dass zukünftige E/E-Architekturen die richtige Infrastruktur und große Chancen bieten werden, um herausragende und attraktive Fahrzeuge auf der Grundlage großartiger Technik zu bauen.

Referenzen:

ADAC. (2021).

 <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/>

Bosch. (2023).

 <https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/fahrsicherheit/powernet-guardian/>

Tesla. (2023).

 <https://digitalassets.tesla.com/tesla-contents/image/upload/IR/Investor-Day-2023-Keynote>

ISO. (2018).

Road Vehicles – Functional Safety – Part 4:
Product development at the system level.
ISO (document ISO 26262-4:2018).

Kilian, P., Köhler, A., Van Bergen, P., Gebauer, C., Pfeufer, B., & Koller, O. (2021).

Principle guidelines for safe power supply systems.
IEEE Access, S. 107751-107766.

VDA. (2023).

Energiebordnetzentwicklung für automatisiertes
Fahren im Rahmen der ISO 26262 (450).
Verband der Automobilindustrie e.V.

Autoren:

Dr. Thorsten Huck, Dr. Andreas Achtzehn,
Dr. Felix Hoos, Alexander Fuchs,
Jonas Stüble, Dr. Tobias T. Traub,
Vasileios Kourtidis, Manuel Eder,
Dr. Karsten Wehefritz

Robert Bosch GmbH

Cross-Domain Computing Solutions
Systems and Advanced Engineering

Warum Bosch?

Bosch ist mit seinen Produkten und Dienstleistungen über den gesamten Technologie-Stack hinweg ihr Partner für innovative Hardware-, Software- und Systemlösungen. Dabei stützt sich unser Expertennetzwerk auf jahrelange

Erfahrung, um unsere Kunden bei der Realisierung von kosteneffizienten, skalierbaren und sicheren Lösungen über alle Automotive-Domänen hinweg bestmöglich zu unterstützen.

Kontaktieren Sie uns

Sprechen Sie mit unserem Expertenteam. Wir freuen uns sie bei den nächsten Schritten zur Realisierung ihrer Energiebordnetze kompetent unterstützen zu können.

Dr. Thorsten Huck

Cross-Domain Computing Solutions,
Vice President, Head of Competence
Center E/E Architectures

✉ thorsten.huck@de.bosch.com

☎ +49 7062 911-5539



Mehr Informationen auf
unserer Website
www.bosch-mobility.com



Bosch Mobility auf LinkedIn
[www.linkedin.com/showcase/
bosch-mobility/](http://www.linkedin.com/showcase/bosch-mobility/)

Robert Bosch GmbH

Robert-Bosch-Platz 1
70839 Gerlingen-Schillerhöhe,
Germany