

48V Bordnetzsysteme - Die nächste Generation der Spannungsversorgung?

Prof. Dr. Heinz Rebholz, HTWG-Konstanz

Wie alle Teilsysteme in modernen Kraftfahrzeugen mussten auch die Bordnetze ihren Anteil zur CO₂ Reduktion beitragen. So ist aus dem vormals banalen 12V Bordnetz mit einer „Lichtmaschine“ als Generator ein intelligentes System geworden, das neben einer bedarfsgerechten Verbrauchersteuerung in der Lage ist während Schubphasen zu rekuperieren. Weiterhin konnte erst mit einem geregelten Bordnetz die Stop-Start Technik eingeführt werden. Der Anwender bemerkt, abgesehen von der Stop-Start Technik, derlei technische Feinheiten wohl kaum. Im NEFZ-Zyklus hingegen zeigt sich ein messbarer Vorteil bei der CO₂ Bilanz des Fahrzeugs.

Eine signifikante Verbrauchseinsparung ergibt sich mit Hilfe der bekannten Hybrid- Technik. Allerdings weist die über ein Hochvoltnetz versorgte Antriebseinheit (meist eine permanent erregte Synchronmaschine) zahlreiche Nachteile auf. Ein Kostentreiber sind die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen bezüglich der Spannungslage oberhalb der Schutzkleinspannung von 60V. Neben einer Isolationsüberwachung sind zahlreiche Einzelmaßnahmen notwendig (z.B. zusätzliche Crashsensoren, Stecksysteme mit Prüfspannungen > 1kV, u.v.m) um auch im Fehlerfall sichere Systeme zu erhalten und den Personenschutz zu gewährleisten. Die Sicherheitsanforderungen hören natürlich nicht beim Anwender auf, sondern müssen neben dem Servicefall, After-Sales, After-Market bis hin zur Entsorgung der Fahrzeuge durchdacht werden.

Was liegt also näher die Spannung soweit abzusenken, dass sämtliche Schutzmaßnahmen entfallen können - damit kann es sich natürlich nur um eine Spannungslage < 60V handeln. Bereits eine elektrische Leistung im Bereich 10-15kW (Antriebs- und Rekuperationsleistung) ist ausreichend für längere Motor-Aus Phasen wie z.B. im Segelbetrieb (Geschwindigkeit halten), erweiterter Stop-Start-Phasen sowie Fahrzeugbewegungen im Stop& Go Verkehr. Je nach eingesetztem Speicher und Leistung der E-Maschine kann damit eine CO₂-Reduktion von 15- 20% vor Kunde angenommen werden [1], [4]. Direkt im Antriebsstrang angebrachte Systeme sind von der Leistung bzw. dem maximalen Drehmoment das über einen Riemen übertragen werden muss nicht begrenzt und bieten daher ein noch größeres Einsparpotenzial. Hier besteht die Herausforderung allerdings darin die notwendigen Ströme (>300A) im Fahrzeug sicher zu verteilen.

Der zweite Treiber hin zur neuen Spannungslage ist der zunehmenden elektrischen Verbraucherlandschaft geschuldet. Komfortverbraucher wie elektrische Fahrdynamikregelsysteme benötigen Peakleistungen von mehr als 1kW. Damit kommen selbst intelligente 12V Bordnetze nicht zurecht. Auch ein moderner Drehstromgenerator wird mit solch kurzzeitigen Zusatzanforderungen schlichtweg überfahren.

Eine angehobene Spannungslage mit ausreichendem Speicher würde auch hier die Lösung bringen. Oder allgemein: Was tun falls das 12V Bordnetz zu wenig Leistung hat – die Leistung allerdings kein HV-System rechtfertigt?

Die Zulieferer haben mittlerweile reagiert und eine beachtliche Vielfalt an Komponenten auf der neuen 48V Spannungslage entwickelt. Die Umsetzung bzw. die Entscheidungsfreude der OEMs hält

sich allerdings noch in Grenzen, womit die aktuellen Serienanläufe mit einer 48V Beteiligung bisher noch überschaubar sind.

Nachfolgend werden die Risiken und Chancen der neuen 48V Technik aus der Sichtweise der Elektronikentwicklung näher betrachtet.

48V: Warum kommt mir die Zahl so bekannt vor?

Ja, den älteren Kollegen unter uns kommt die Zahl durchaus bekannt vor. Anfang der 90er Jahre wurde versucht das gesamte 12V Bordnetz auf ein 42V Netz anzuheben. Damals wie heute wurde die nominale Spannungslage an den verfügbaren Speichersystemen angelehnt.

Da wir das neue 48V System hauptsächlich zur CO₂ Reduktion verwenden wollen muss der verwendete Speicher in der Lage sein Rekuperationsenergie aufzunehmen und in der nächsten Beschleunigungsphase wieder abzugeben. Das bedeutet nichts anderes, als dass die Batterie eine hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen verarbeiten können muss.

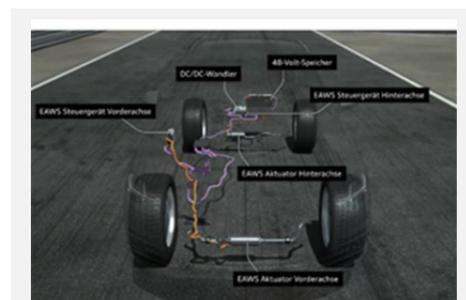
Oder im Umkehrschluss: Der Spannungspegel im 48V Netz wird in den seltensten Fällen exakt 48V betragen, sondern sich im Arbeitsbereich zwischen 36V und 54V bewegen. Werden Spannungsabfälle entlang der Leitungen mit berücksichtigt muss eine Betriebsspannung bis zu 54V zugelassen werden um die Batterie auf den maximalen SOC anzuheben. Es verbleibt somit ein Delta von 6V zur kritischen Berührungsschutzspannung von 60V, die zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf.

Die minimal mögliche Spannung im System wird ebenfalls von zwei Faktoren beschränkt. Zum einen darf die untere Spannungsgrenze bzw. der minimale SOC der Speichertechnik nicht aus den Augen verloren werden, zum anderen darf bei konstanter Leistungsabgabe ein zulässiger Maximalstrom nicht überschritten werden. Während die obere Spannungsgrenze durch die Berührungsschutzspannung in Stein gemeißelt ist, kann die untere Spannungsgrenze je nach verwendeter Speichertechnologie bzw. Anwendung variieren.

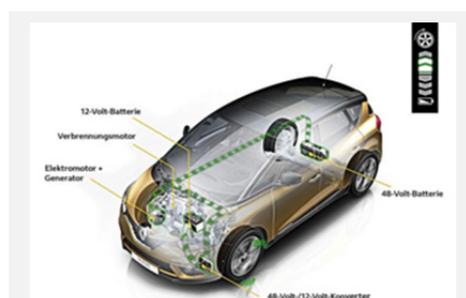
Stand der Technik

Zurzeit sind verschiedenste 48V Applikationen in der Entwicklung. In der einfachsten Anwendung besteht das 48V Netz aus wenigen Komponenten die aus der 12V Seite gespeist werden. Das Teilnetz wird dabei über einen DC/DC Wandler entkoppelt und mit einem Speicher versehen um transiente Leistungsspitzen, z.B. für Fahrwerksverbraucher oder einen elektrischen Turbolader, zur Verfügung zu stellen. Das 12V Bordnetz wird im zeitlichen Mittel nur geringfügig belastet (wenige 100W), wohingegen auf der 48V Seite kurzzeitig Leistungen im kW Bereich möglich sind. Ein Beispiel hierfür ist z.B. die elektrische Wankstabilisierung im Audi SQ7 [2].

Soll mit Hilfe der 48V Ebene eine signifikante CO₂ Reduktion erzielt werden, muss eine Möglichkeit gefunden werden die elektrische Energie in die Fahrzeugbewegung umzuwandeln. Die typischerweise eingesetzte Synchronmaschine muss dann neben der Motorunterstützung dafür verwendet werden die Energiebilanz im 48V System auszugleichen. Hier



48V Bordnetz mit Wankstabilisierung. Bild [2]



Renault Scenic. Bild Renault

kommt der bereits zuvor beschriebene Lade-Entladezyklus zum Einsatz, in Abhängigkeit des angenommenen Fahrprofils.

Entscheidend für die Effizienz bzw. das maximal einsetzbare zusätzliche Drehmoment der Systeme ist die Art der Anbindung an den Antriebsstrang. In den meisten Fällen wird auf eine bekannte Topologie aufgesetzt und zu einem 48V Bordnetz erweitert. Die einfachste Variante besteht darin den 12V Drehstromgenerator durch einen 48V Riemen- Starter Generator (RSG) zu ersetzen. Diese Konfiguration ist z.B. im aktuellen Renault Scenic zu finden [3] mit einer Spitzenleistung von 10kW. Nachteilig ist, dass bei elektrischer Fahrt über den RSG der Motor geschleppt werden muss. Weiterhin muss der Riemen in der Lage sein die Leistung zu übertragen bzw. genug Moment aufzubringen für den Motorstart.

Eine effiziente Lösung besteht darin die elektrische Maschine hinter dem Motor bzw. dem Getriebe zu platzieren. Bei elektrischer Fahrt kann der Motor abgekuppelt werden, die Kraftübertragung erfolgt direkt an der Antriebswelle. Diese Möglichkeit mit einem integrierten Starter-Generator (ISG) benötigt



ISG, Bild Daimler

allerdings weitreichende Maßnahmen in den Komponenten Getriebe, Kupplung und dem Antriebsstrang und kann somit nicht ohne weiteres in eine bestehende Konfiguration integriert werden.

David gegen Goliath, 48V vs. 400V (HV)-Systeme

Ein etabliertes 48V Bordnetz im Fahrzeug eröffnet für viele Fachgebiete neue Möglichkeiten in der Umsetzung ihrer Funktionen, die bisher nur mechanisch zu lösen waren. Die sich bereits in Serie befindliche elektrische Wankstabilisierung ist hier nur ein Beispiel unter vielen Anwendungen. Fieberhaft wird an weiteren Anwendungen wie eine elektrische Turboaufladung oder Luftfedersystemen gearbeitet. Selbst die Abgasnachbehandlung kann mit Hilfe von 48V Komponenten optimiert werden.

Die Einführung der 48V Ebene wird nur noch gebremst durch die aktuell unsichere Entwicklung der Elektrofahrzeuge.

Sollen neue Komponenten auf eine 48V Ebene gehoben werden, wohl wissend, dass eine spätere Integration in Elektrofahrzeuge nachteilig ist?

Die Neuentwicklung eines Steuergeräts ist stets kosten- und zeitintensiv. Wird durch die singuläre Verfügbarkeit von 48V Komponenten in Elektrofahrzeugen neben der 12V und HV-Spannung eine weitere Spannungslage erzwungen, ist der heutige Vorteil verpufft bzw. wird sich zu einem Nachteil wandeln. Die Integration in ein Elektrofahrzeug bedeutet ein weiteres Batteriesystem das über einen zusätzlichen HV/48V DC/DC Wandler versorgt werden muss.

Für Fahrzeughersteller die den Flottenverbrauch über die Einführung von Elektro- und Hybridfahrzeugen den gesetzlichen Rahmenbedingungen anpassen spielt die 48V Technik somit sicher eine untergeordnete Rolle. Wird weiter auf den Verbrennungsmotor gesetzt führt an der Einführung einer „leichten“ Elektrifizierung über die 48V Ebene kein Weg vorbei. In der höchsten Ausbaustufe kann gezeigt werden, dass ISG Systeme einen ähnlichen CO₂ Vorteil versprechen analog den Hybridsystemen der ersten Generation.

Vorteile der 48V Technik

Neben der Verbrauchsreduktion durch die elektrische Motorunterstützung bzw. Rückgewinnung der Bremsenergie bietet die neue Spannungslage die Möglichkeit elektrische Verbraucher mit einer Spitzenleistung von mehr als 1kW problemlos zu versorgen. In modernen Fahrzeugen der Premiumklassen beträgt die installierte Verbraucherleistung ca. 6-8kW. Dem gegenüber steht ein mit 3-3,5kW starker Generator. Ein intelligentes Energiemanagement ist für eine ausgeglichene Ladebilanz demnach unerlässlich. Je nach Fahrsituation und Dringlichkeit müssen einzelne Verbraucher priorisiert werden. Beispielsweise wird die Entfrostung einer Heck- oder Frontscheibe stets Vorrang erhalten. Komfortfunktionen wie die Sitz- oder Lenkradheizung falls notwendig gedrosselt. Weitere Hochstromverbraucher auf der 12V Seite anzusiedeln ist nicht mehr möglich. Insbesondere falls es sich um Verbraucher handelt die dauerhaft verfügbar sein müssen wie Fahrwerks-, Antriebs- oder Abgasreinigungssysteme. Verbraucher die nur sporadisch, mit Leistungen kleiner 1kW, agieren können auch zukünftig auf der 12V Seite verbleiben.

Mögliche Kandidaten für eine Anhebung auf die 48V Seite:

- Scheibenheizung
- Kühlerlüfter
- Innenraum PTC
- Innenraumgebläse
- elektr. Lenkung
- Heizsysteme allgemein

Mit steigender Spannung geht der Strom proportional nach unten, womit sich ein geringer Gewichtsvorteil in der Leitungsstruktur der Fahrzeuge ergeben kann. Gleichwohl wird sich das notwendige Mehrgewicht durch den Speicher, DC/DC Wandler und ggf. RSG damit nicht kompensieren lassen.

Nachteile der neuen Technik

Der Einsatz der neuen 48V Technik bringt natürlich auch Nachteile mit sich. Im ersten Schritt der Daseinsberechtigung muss der Mehraufwand in Kosten und Gewicht hinsichtlich zusätzlicher Funktionalität bzw. CO₂ Optimierung gerechtfertigt werden. Ansonsten wird jede Führungsebene die Idee als nette Spielerei von Elektroingenieuren wieder verschwinden lassen.

Ganz ohne Sicherheitsvorkehrungen geht es beim 48V Bordnetz ebenfalls nicht. Wie beim herkömmlichen 12V Bordnetz sollte ein satter Kurzschluss tunlichst vermieden werden. Da bereits Kriechströme auf der 12V Seite als kritisch eingestuft werden, müssen ungewollte Stromflüsse in 48V Systemen ebenfalls unterbunden werden.

Die eingesetzten 48V Speicher werden üblicherweise im Ruhezustand über ein Trennelement deaktiviert. Dennoch verbleiben Bezüglich der Sicherheitsvorkehrungen einige Arbeitspunkte:

- Wie erkennt der Servicetechniker eine 48V Komponente?
- Wie kann der sichere Aus- Zustand in der Werkstatt detektiert werden?
- Wie wird gegen Wiedereinschalten geschützt?
- Wie werden 48V Komponenten nach einem Crash überprüft?

In allen Punkten handelt es sich um Arbeitspunkte, die entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Kritischer ist die Tatsache, dass sich im Fehlerfall ungewollte Lichtbögen ausbilden können. Dabei lassen sich zwischen zwei Arten von Lichtbögen unterscheiden.

Serielle Lichtbögen treten immer dann auf wenn der Stromfluss unterbrochen wird z.B. bei einem Leitungsabriss oder ziehen von Kontakten unter Last. Die angeschlossene Leitung mit Ihrer Eigeninduktivität wirkt wie eine Stromquelle bzw. der Stromfluss wird konstant gehalten, unabhängig ob ein Leiter vorhanden ist oder nicht. Im Falle einer Leitungsunterbrechung wird sich der Stromfluss als serieller Lichtbogen über das Plasma fortsetzen. Serielle Lichtbögen können über mehrere Wege verhindert werden:

- Sicherstellen, dass keine Kontakte abgezogen werden können unter Last (z.B. Poka-Yoke mit dem Signalstecker -> SG wird deaktiviert)
- Kontrollierte Leitungsführung im Fahrzeug, aussparen von Crash-Zonen (verhindern von Leitungsabrissen auch im Crash-Fall)
- Erhöhte Eingangskapazität an den betroffenen Steuergeräten (kurzzeitige weitere Stromaufnahme der SG wird sichergestellt, Lichtbogen erlischt)
- Geschraubte Kontakte (unbeabsichtigtes Abziehen durch Kunde oder Service wird verhindert)

Bisher ungelöst und in der Fachwelt kontrovers diskutiert ist der Umgang mit stromschwachen parallelen Lichtbögen. Wird ein satter Kurzschluss unweigerlich zum Auslösen des Leitungsschutz bzw. der Batteriesicherung führen, bleibt ein Fehlerstrom der sich in der Größenordnung der Verbraucherströme bewegt unbemerkt. Möglich werden parallele Lichtbögen erst dadurch, dass der Rückleiter analog der 12V Technik über die Karosserie ausgeführt ist. Vermutlich lassen sich entsprechend dem 12V Netz Fehlerströme nie ganz verhindern. Allerdings muss durch geeignete Maßnahmen deren Auftretswahrscheinlichkeit minimiert werden. Die pragmatische Lösung ist dafür zu sorgen, dass ein Lichtbogen nicht auftreten kann. Dies wird über konstruktive Lösungen erarbeitet:

- Keine Leitungen im Crash-Bereich des Fahrzeugs
- Deaktivierung des 48V Bordnetz bei erkanntem Crash
- Verstärkter Leitungsmantel in kritischen Bereichen
- Abstand zu benachbarten 12V Leitungen

Ein beeindruckender Laborversuch ist über ein 50V fähiges Netzteil einen Lichtbogen zu zünden. Das Bild zeigt eine Lichtbogensimulation mit einem auf 5A begrenzten Netzteil und zwei laborüblichen Steckkontakten. Der Lichtbogen lässt sich wie ein Streichholz anzünden und bleibt mit ca. 6mm stabil stehen, solange bis man die Kontakte aufgrund der Wärmeentwicklung freiwillig loslässt.



Lichtbogenversuch im Labor

Aus benachbarten Ingenieurwissenschaften wie der Photovoltaik oder der Mittelspannungstechnik sind verschiedene Lösungen zur Lichtbogendetektion bekannt. Die meisten Verfahren verwenden dazu Informationen aus dem Frequenzbereich, da sich ein Lichtbogen in vielen Fällen als breitbandiger Störer bemerkbar macht. Alle Verfahren haben den Nachteil von zusätzlichem Hardwareaufwand bzw. konnten noch nicht nachweisen in allen Fällen über die Fahrzeuglebensdauer zuverlässig zu funktionieren.

Neben den Lichtbögen existiert noch ein weiteres Schreckensszenario, das neben dem Fahrzeugbrand den wirtschaftlichen Totalschaden des Fahrzeugs bedeutet. Ein ungewolltes Übersprechen bzw. eine niederohmige galvanische Verbindung der beiden Teilnetze bei dem die Kl. 30 auf 48V Potenzial gezogen wird für eine längere Zeit bedeutet sowohl für die Kommunikation als auch für die Eingangsbeschaltung der meisten Steuergeräte den sicheren Tod. Je nach Fahrzeugtopologie bzw. eingesetztem Speicher (insbesondere dessen Leistungsfähigkeit) müsste ein Großteil der 12V Steuergeräte ersetzt werden. Das ungewollte Übersprechen der Spannungslagen muss somit sowohl in jedem betroffenen Steuergerät als auch in der Leitungsverlegung berücksichtigt werden. Meist sind konstruktive Maßnahmen ausreichend um das Übersprechen zu verhindern.

Eine Ausnahme stellt der DC/DC Wandler dar. Er ist das Verbindungsglied zwischen den beiden Teilnetzen und hier als die kritische Komponente anzusehen. Über entsprechende ASIL Einstufungen mit hinterlegten Maßnahmen muss verhindert werden, dass die maximalen Spannungen auf beiden Seiten des Wandlers eingehalten werden.

Wie viele Batterien benötigt ein Fahrzeug?

Schrumpfende 12V Batterien sollen ebenso zur Gewichtsreduktion beitragen wie konstruktive Maßnahmen im Fahrzeugaufbau. Die maximale Anzahl an unterschiedlichen Batterien im Fahrzeug wird erreicht falls es in einem Hybridfahrzeug notwendig wird eine 48V Komponente mit einer Insellösung zu versorgen. Neben der 12V und HV-Batterie muss ein 48V Speicher im Fahrzeug integriert werden. Dies wird allerdings sicher nicht der Normalfall darstellen.

Kann in einem Fahrzeug mit 48V RSG oder ISG auf die
12V Fahrzeugbatterie verzichtet werden?

Um diese Frage zu beantworten sind noch einige technische Zusammenhänge zu klären. Aus Sicherheitsgründen wird der 48V Speicher in der aktuellen Generation im Ruhezustand getrennt. Damit wird zum einen eine ungewollte Selbstentladung (Ruhestromproblem) verhindert, zum anderen ist man hinsichtlich der Kontaktkorrosion und ungewollter Kriechstrecken auf der sicheren Seite. Die grundsätzliche Elektronikarchitektur geht weiterhin davon aus, dass alle Signalebenen aus der 12V Seite versorgt werden. Daraus folgt, dass alle Steuergeräte mit oder ohne 48V, nach wie vor an die Kl. 30/31 angeschlossen sind. Nur so können die Steuergeräte im Kommunikationsverbund teilnehmen auch ohne einen aktivierten 48V Speicher (Übernahme aus HV-Systemen).

Für einen kompletten Entfall der 12V Batterie müssen somit im ersten Schritt die technischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass der 48V Speicher analog heutiger 12V Speicher dauerhaft aktiv bleibt. Um das Fahrzeug zu „wecken“ (Kommunikationsverbund startet) muss ein zentrales Steuergerät auf 48V gehoben werden das den Kundenwunsch erkennt. Alternativ und wenig sinnvoll wäre ein dauerhaft aktiver DC/DC Wandler zur Versorgung des Zentralrechners aus der 48V Seite.

Insbesondere da sich die Mehrzahl der sicherheitskritischen Steuergeräte wie Airbag-SG, ESP, Motorsteuerung und Zentralrechner auf der 12V Seite befinden, wird es schwer den LV-Speicher gänzlich zu eliminieren. Die Diskussion wird weiter verschärft wenn es notwendig ist die Bordnetzanforderungen an das autonome Fahren zu definieren. Eine rein singuläre Versorgung über den DC/DC Wandler aus der höhergelegenen Ebene muss genau bewertet werden.

Normung / Prüftechnik

Jede Technik erfordert für ein reibungsloses Zusammenspiel unterschiedlicher Komponenten vorgegebene Betriebsbedingungen und Regel innerhalb dessen sich die Komponenten bewegen. Neben den Sollwerten müssen in diesen Regeln das Betriebsverhalten in den Grenzbetriebspunkten sowie Störfestigkeits- und Emissionsgrenzwerte definiert werden. Die Prüfvorschrift VDA320 [5] „Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48V-Bordnetz“ definiert Anforderungen und Prüfungen an Komponenten für den Einsatz in einem 48V Bordnetz.

Fragen an die Technik

Die bisherigen Erfahrungen mit 48V Systemen sind vielversprechend und lassen uns mit Spannung in die Zukunft schauen. Damit sich die noch junge Technik weiter durchsetzt und sein ganzes Potenzial ausschöpft sind zuvor noch einige technische Fragen zu beantworten.

Ein großes Thema ist die Lichtbogenvermeidung und deren Detektion im Fahrzeug. Sollen möglichst viele Komponenten auf die neue Spannungslage angehoben werden ist es notwendig Steuergeräte auch in einer direkten Crash-Zone unterzubringen. Dazu muss allerdings der gesamte Ablauf von den Entstehungsmöglichkeiten ungewollter Fehlerströme bis zur Abschaltung des Gesamtsystems genau verstanden werden.

Die erste Generation 48V fähiger Steuergeräte verwendet für die Kommunikations- und Steuerungsarchitektur nach wie vor den Kl. 30 (12V) Anschluss. Für den Kommunikationsverbund ist somit immer eine aktive 12V Seite mit einem 12V Speicher notwendig. Für eine dauerhafte 48V Versorgung sowie für ein Fahrzeug ohne 12V Speicher müssen die Voraussetzung einer sicheren 48V Kommunikation entwickelt werden. Weiterhin sind die Auswirkungen auf Steck- und Kontaktsysteme mit einer dauerhaften 48V Versorgung noch nicht geklärt bzw. über Lebensdauer nur schwer abschätzbar.

Das größte Hindernis besteht in den zusätzlichen Kosten die aufgebracht werden müssen im Vergleich zu dem vor Kunde erhaltenen Mehrwert. Ob sich die 48V Technik final durchsetzen kann hängt weiterhin neben den technischen Fragstellungen von der Strategie der einzelnen Fahrzeughersteller ab. In der aktuellen Form ist ein 48V Bordnetz an Verbrennungsmotoren gekoppelt.

Ergibt sich für die Verbrenner keine Zukunft werden es zukünftige 48V Netze schwer haben sich durchzusetzen bzw. als einzelner Inselverbund ein Nischendasein führen.

Literatur / Verweise

- [1] 48-Volt-Bordnetz – Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.
- [2] www.audi-technology-portal.de/de
- [3] <http://www.continental-corporation.com>
- [4] 48V Technology, Bernhard Klein, Oliver Maiwald, ISBN 978-3-86236-102-1, [Link](#)
- [5] VDA320, VDA Empfehlung Elektrische und elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug 48V-Bordnetz

Autor



Prof. Dr. Heinz Rebholz lehrt an der HTWG-Konstanz

Leistungselektronik und EMV.

Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung von effizienten und EMV-optimierten Wandler-Systemen für zukünftige Bordnetz- und Antriebssysteme.

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

HTWG Konstanz

Hochschule Konstanz

Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Alfred-Wachtel-Straße 8

78462 Konstanz

Tel: 07531 206 220

heinz.rebholz@htwg-konstanz.de