



VDE-Kompodium „Elektromobilität“



Symposium Elektromobilität – Ausgewählte Vorträge



Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	4
Batterie- und Umwelttestzentrum des VDE	10
Keynote „Automobilhersteller müssen die Kompetenzen zur Elektromobilität ins eigene Haus integrieren.“	
Ricky Hudi, Audi AG	12
Session 1	18
Batteriesysteme	
Batteriepacks – System aus vielen Teilen und komplexen Wechselwirkungen mit dem Fahrzeug	
Susanne Rothgang, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen	18
Batterie Recycling – ein nachhaltiger Beitrag zur Ressourcenschonung und Versorgungssicherheit wertvoller Batteriematerialien	
Frank Treffer, Umicore AG & Co. KG	25
Session 2	32
Hochvolt-Bordnetz	
Elektrische Sicherheit als Basis für die Elektromobilität – Ganzheitliche Betrachtung der Sicherheit von E-Fahrzeugen	
Wolfgang Hofheinz, Bender GmbH & Co. KG und Vorsitzender der VDE DKE	32
Retten und Bergen von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben	
Armin Gräter, BMW AG	36
ECE-R 10 Revision 4 – eine neue Norm für EMV-Anforderungen an E-Fahrzeuge	
Dr. Stephan Kloska, VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH	43



Executive Summary

Am 5. Juli 2012 wurde in Offenbach das neue VDE Batterie- und Umwelttestzentrum eröffnet. Im begleitenden Symposium, dessen Vorträge auch die Grundlage dieses Kompendiums bilden, diskutierten anerkannte Experten den aktuellen Stand der Dinge der Batterietechnologie und der Elektromobilität. Darüber hinaus gaben sie auch einen Ausblick in die Zukunft dieser Themen. Die behandelten Aspekte reichten dabei von der Batterie selbst über die Komponenten des Hochvolt-Bordnetzes bis hin zum Ladevorgang. Ein Thema, dass sich dabei durch das gesamte Symposium zog, war die Sicherheit der aufgezählten Teilaspekte der Elektromobilität. Alle Experten waren sich darüber einig, dass nur mit maximaler Sicherheit dauerhafte öffentliche Akzeptanz für die neue Mobilitätsform zu erreichen ist. Nur mit Akzeptanz wiederum lässt sich ein Massenmarkt aufbauen.

Key Note Audi AG

Die Key Note wurde von *Ricky Hudi, Leiter der Entwicklung Elektrik / Elektronik bei der Audi AG*, gehalten. Er begann seinen Vortrag mit einem klaren Bekenntnis zur Elektromobilität. Das Zeitalter dieses Antriebskonzepts sei ganz klar eingeläutet. Aus seiner Sicht werden rein batteriebetriebene Elektroautos zwar in nächster Zeit noch nicht den Massenmarkt erobern. Dennoch wird die Technologie über Hybridfahrzeuge und durch Range Extender unterstützte Batterieantriebe an den Massenmarkt herangeführt. Diese Fahrzeugklassen sind damit wichtige Technologietreiber für die Weiterentwicklung elektronischer Antriebe. Interessanterweise sieht Hudi den gesamten Megatrend Elektromobilität auch als Technologietreiber für weitere Innovationen des Verbrennungsmotors. Dies geschehe nicht unbedingt durch eins zu eins übertragbare technische Lösungen, sondern vielmehr über den aufgebauten Druck zum weiter sparsamen Umgang mit fossilen Brennstoffen. Stichworte sind hier beispielsweise die Verwendung von Leichtbaumaterialien im Karosseriebau oder die weitere Entwicklung extrem sparsamer Verbrennungsmotoren.

Viele namhafte Autobauer haben bereits Programme zur Entwicklung massenmarktauglicher Elektroautos aufgesetzt, so auch Audi. Hudi stellte die Frage, wie tief die Automobilhersteller in das für sie eigentlich neue Thema Elektrifizierung einsteigen sollen. Sollen sie die Elektrifizierung



erfahrenen Unternehmen aus der Elektrobranche überlassen und selbst nur das Fahrzeug drum herum entwickeln? Oder sollen sie nur Batteriezellen von Fremdherstellern kaufen und die gesamte restliche Integration ins Auto selbst vornehmen? Oder sollen Automobilhersteller sogar Batterieproduzenten werden? Hudi führte aus, dass man sich bei Audi für den mittleren Weg entschieden hat. Die Batteriezellen werden von einem Partner eingekauft (Panasonic), die gesamte nachfolgende Kompetenz im Bereich Batteriesysteme und Integration ins Fahrzeug wird aber bewusst im eigenen Haus aufgebaut und gehalten. Der Aufbau solcher Kompetenzen bei den Fahrzeugherstellern ist aus Hudis Sicht eine entscheidende Weichenstellung für den Erfolg der Autokonzerne in der Elektromobilität. Denn nur so ließen sich die komplexen Wechselwirkungen aus Zuverlässigkeit, Gewicht, Reichweite und Wirtschaftlichkeit verstehen und in marktfähige Modelle überführen.

Hudi rundete seinen Vortrag mit Betrachtungen zu zwei weiteren Megatrends der nächsten Dekade ab: der Vernetzung des Autos mit seiner Umwelt und dem pilotierten Fahren. Für beide Themen gibt es bereits erste Produkte am Markt, weitere stehen kurz vor der Markteinführung. Zusammen mit der Elektrifizierung werden sie die individuelle Mobilität in den nächsten 10 bis 20 Jahren deutlich von dem weiterentwickeln, was heute Alltag ist.

Session 1: Batteriesysteme

Im weiteren Verlauf des Symposiums wurden in drei Sessions alle fahrzeugnah relevanten Aspekte der Elektromobilität behandelt. Die Sessions orientierten sich dabei von einer Mikro- hin zu einer Makroperspektive. Zuerst gab es Betrachtungen zur Batterie als absolut zentraler Komponente des gesamten Systems. Es folgten in der zweiten Session Vorträge zur Integration der Batteriepacks in Fahrzeug und Antriebsstrang sowie die dazugehörigen Sicherheitsaspekte. In der dritten Session schließlich drehte sich alles um die Verbindung des elektrischen Systems des Autos nach außen: den Ladevorgang.

Die erste Session zu Batteriesystemen wurde durch einen Vortrag von *Susanne Rothgang (RWTH Aachen)* eröffnet. Ihre grundlegenden Betrachtungen zu Li-Ionen-Akkus zeigten, dass es nicht das eine optimale Batteriesystem gibt. Vielmehr müsse immer eine Balance zwischen so unterschiedlichen Aspekten wie Leistung, Gewicht, Baugröße und Preis gefunden werden. Sie stellte einige der Designmöglichkeiten für die unterschiedliche Betonung der einzelnen Aspekte vor, so zum Beispiel die



Zellart und Zellform. Die Auswahl einer guten Zelle sei zwar Voraussetzung für ein gutes Batteriesystem, reiche aber allein noch nicht aus. Entscheidend seien vielmehr weitere Aspekte wie Topologie, Batteriemanagementsystem und Kühlung. Gerade die Kühlung sei ein gutes Beispiel für die Abwägung, die Hersteller von Batteriepacks treffen müssten. Zwar sei sie für die Sicherheit der Batterien unabdingbar, gleichzeitig verursache sie hohe Kosten. Gerade die Kostenoptimierung ist aber ein wichtiger Faktor für günstige und damit massentaugliche Elektrofahrzeuge.

Frank Treffer (Umicore AG) erörterte die Frage, wie ein gutes Recyclingkonzept für Altakkus aussehen kann. Denn anders als beim System Verbrennungsantrieb, wo ein wirkungsvolles Recyclingkonzept erst Jahrzehnte später nachgeliefert wurde, bietet das jetzt beginnende System Elektromobilität die Chance auf die frühzeitige Mitentwicklung eines solchen Verwertungskonzepts. Er stellte einen dreistufigen Recyclingprozess bestehend aus den Schritten Sammlung, Vorbereitung und pyrometallurgischem Recycling vor. In einer Demoanlage in Hoboken (Belgien) hat Umicore einen solchen Recyclingprozess zur Marktreife gebracht und sammelt dort gemeinsam mit den Batterieherstellern weitere Erfahrungen.

Damit waren die wichtigen Basisthemen Batterie und Batteriesysteme erörtert. Wirtschaftlichkeitsstudien zur Elektromobilität zeigen immer wieder, dass die Batterie sowohl vom Kostenfaktor als auch von der Reichweite nach wie vor der kritische Punkt im gesamten System Elektromobilität ist. Daher sind auf diesem Gebiet auch in den nächsten Jahren weitere Forschungsarbeiten und Innovationen zu erwarten. Das VDE Batterietestzentrum wird dabei Teil dieses andauernden Prozesses sein.

Session 2: Hochvolt-Bordnetz

In der nächsten Session drehte sich alles um die Integration der Batterien ins Fahrzeug und die Übertragung der elektrischen Energie im Hochvolt-Bordnetz. Die behandelten Themen reichten von der elektrischen Sicherheit (Stichwort Isolationsfehler), über die funktionale Sicherheit von Elektrofahrzeugen im Betrieb und nach einem Unfall bis hin zu aktuellen EMV-Anforderungen an die Fahrzeuge. Dr. Martin März vom Fraunhofer IISB stellte außerdem sein Konzept zur Optimierung des Antriebsstrangs bei Hybridfahrzeugen vor. Dieser Ansatz kommt zwar bisher nicht bei rein batteriebetriebenen Fahrzeugen zum Einsatz, gibt aber wichtige Impulse



zur platzsparenden und kostengünstigen Integration von Hochvoltkomponenten.

Im ersten Vortrag beschäftigte sich *Wolfgang Hofheinz (Bender GmbH und Vorsitzender der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (VDE | DKE))* mit dem Risiko des Isolationsfehlers in der Elektromobilität. Er wies darauf hin, dass es bei der Verwendung der verbreiteten Fehlerstrom-Schutzeinrichtung Typ A zum Auftreten höherer Fehlergleichströme als den normativ zulässigen 6 mA DC kommen kann. In einem solchen Fall könnte dann die vorgeschaltete Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) „erblinden“, da sich deren Ansprechzeit und Ansprechwert negativ verändern würde. Als Lösungsansatz bietet sich allstromsensitive Sensorik in Form einer spannungsabhängigen DC $\geq 6\text{mA}$ Fehlerstromüberwachung an. Eine solche allstromsensitive 6 mA Sensorik ist kostengünstiger als eine galvanische Trennung von Gleich- und Wechselstromsystemen. Sie ist auch kostengünstiger als die Aufrechterhaltung eines ausreichend hohen Isolationswiderstands während der gesamten Lebensdauer des Elektrofahrzeugs. Damit ist diese spezielle Schutzergänzung zuverlässig und wirtschaftlich und für die Anwendung in der Elektromobilität geeignet.

Armin Gräter (BMW AG) sprach anschließend über die funktionale Sicherheit bei Elektrofahrzeugen sowie Besonderheiten beim Retten und Bergen solcher Autos. Sein Vortrag ergänzte den von Dr. Kern aus der ersten Session, der sich speziell auf ein sicheres Batteriesystem fokussiert hatte. Beides zusammen, eine sichere Batterie und ein sicheres Auto drum herum tragen ganz entscheidend zu sicherer Elektromobilität bei. Bei BMW werde das Ziel verfolgt, Elektroautos mindestens so sicher zu machen wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Nach Möglichkeit soll sogar ein höheres Sicherheitsniveau erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen wird bei BMW mit Use Cases, Fehlerbäumen und der Analyse des vorhersehbaren Fehlgebrauchs gearbeitet. Für den Fall, dass das Auto dennoch in einen Unfall verwickelt wird, hat das Herstellen von Spannungsfreiheit oberste Priorität. Dies kann durch ein Öffnen der Batterieschützer via Airbagsensor, einen aktiven Kurzschluss des Motors und die aktive Entladung von Hochvoltverbrauchern erreicht werden.

Dr. Stephan Kloska (VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH) sprach über neue EMV-Anforderungen an Elektrofahrzeuge. Denn durch die Hochvoltbordnetze gibt es ganz neue Störquellen und Störsenken in den Fahrzeugen. Zu den Störquellen gehören beispielsweise Frequenzumrichter mit sehr hoher Leistung, die Schaltung mit schnellen Transistoren oder das



Verhalten der Ladegeräte. Er zeigte auf, dass Fahrzeuge mit aus dem Energieversorgungsnetz aufladbaren Antriebsbatterien nach ECE-R 10 Revision 4 für eine Typgenehmigung geprüft werden können. Zu beachten sei, dass diese neue Revision nur die Intersystem-EMV betrachtet. Die Verbindung zur Ladesäule bedeutet für die Automobilwelt neue Anforderungen für das Ladekabel.

Dr. Martin März (Fraunhofer IISB) sprach schließlich über die Optimierung des Antriebsstrangs bei Hybridfahrzeugen. Sein Ansatz basiert dabei auf wirkortnaher Systemintegration und DC/DC-Wandlern. Unter wirkortnaher Systemintegration versteht er dabei die Platzierung der Leistungselektronik dort, wo sie ihrer Funktion gemäß hingehört. Ein solches Konzept reduziere Gewicht und Platzbedarf, die Komplexität des Systems und dadurch schließlich die Kosten. Zusätzlich betonte er die Wichtigkeit intelligenter Batteriesysteme, die für eine deutlich erhöhte Funktionalität und vereinfachte Fahrzeugintegration unabdingbar sind, eine Aussage, die sich mit der von Susanne Rothgang aus der ersten Session deckt.

Session 3: Ladevorgang

Nach dem in der zweiten Session die Komponenten innerhalb des Elektrofahrzeugs behandelt wurden richtete sich in der letzten Vortragsrunde der Blick nach außen – auf das Ladesystem. Zwei Aspekte dominierten die Vorträge: zum einen die Bedeutung von Software und IT für den Ladevorgang. Diese wurden sowohl von Dr. Tim Schlüsener (Daimler AG) mit seinem Konzept der „SmartCharge Communication“ als auch von Volker Lazzaro (Mennekes Elektrotechnik) aus der Perspektive des Ladesäulenherstellers betont. Als Alternative zur Ladesäule wurde von Prof. Dr. Meins (TU Braunschweig) das induktive Laden vorgestellt. Ein weiterer Aspekt war die Frage der europäischen Normierung der Stecker für Elektroautos (Haimo Huhle, ZVEI).

Dr. Tim Schlüsener (Daimler AG) zeigte, dass das Management des Ladevorgangs absolut nötig ist, da sonst bei zunehmender Verbreitung von Elektroautos das Netz an seine Belastungsgrenzen stoßen würde. Ziel des Lademanagements ist z.B. ein Vermeiden des Ladens zu Spitzenbelastungszeiten für das Netz. Unter dem Begriff „SmartCharge Communication“ wird eine Reihe von Techniken subsummiert, die das Laden flexibler und intelligenter macht. Kern des Ansatzes ist dabei eine bidirektionale Kommunikation zwischen Auto und Ladestation. Das Auto gibt dabei Auskunft über seinen Ladezustand, die optimale Ladekurve für seine Batterie und das gewünschte Zeitfenster zum Laden. In der



gegenseitigen Kommunikation kann zwischen Auto und Netz bzw. Ladesäule dann beispielsweise das Laden in den Nachtstunden ausgehandelt werden, weil dann besonders günstiger Strom verfügbar ist. Mit der Norm „Vehicle to Grid Communication“ ISO/IEC 15118 gibt es bereits einen Kommunikationsstandard für dieses intelligente Laden.

Volker Lazzaro (Mennekes Elektrotechnik) brachte die Perspektive der Hersteller von Ladestationen ein. Dabei zeigte er, dass es bei dem Thema nicht nur um den richtigen Stecker geht, sondern um eine gut abgestimmte Mischung aus elektrotechnischer Hardware und intelligenten IT-Lösungen. So sei ein besonders interessantes Thema in den nächsten Jahren die Integration von Ladestationen in die Business-Backendsysteme der Energieversorger. Geschäftsmodelle wie „wind to vehicle“ oder ein effizientes Lastmanagement im Sinne von Smart Grids werden so möglich. Fragen der Kommunikationsanbindung der Ladepunkte und der Sicherheit spielen dabei natürlich eine entscheidende Rolle.

Eine Alternative zum herkömmlichen drahtgebundenen Ladevorgang ist das induktive Laden. *Prof. Dr. Jürgen Meins (TU Braunschweig)* arbeitet bereits seit mehr als 20 Jahren zu diesem Thema und hat maßgeblich an einer Reihe von Referenzprojekten in der Verkehrstechnik mitgearbeitet. Dazu gehören der Transrapid, das Straßenbahnprojekt „Primove“ in Augsburg und das berührungslose Laden einer elektrifizierten Buslinie in Braunschweig. Die Machbarkeit des berührungslosen Ladens für die Elektromobilität ist also demonstriert. Ein wesentlicher Vorteil des Systems sei die in den Boden eingelassene unsichtbare Infrastruktur. Es droht dann keine Gefahr mehr durch Vandalismus oder Diebstahl – beides wichtige Aspekte bei öffentlichen Ladestationen. Die Ladung funktioniert bei jedem Wetter und praktisch wartungsfrei. All diese Vorteile zusammen machen das induktive Laden zu einer interessanten Alternative beim Ladevorgang von Elektroautos.

Haimo Huhle (ZVEI) schließlich weitete den Blick auf Europa. Er ging in seinem Beitrag der Frage nach, ob Stecker für E-Mobility-Ladesysteme der normalen Niederspannungsrichtlinie unterliegen. Sein Fazit: die Stecker sind in der Tat ein elektrisches Betriebsmittel und fallen damit unter die Niederspannungsregel. Damit wiederum sind sie durch das Recht auf freien Warenverkehr innerhalb der EU geschützt. Ein in einem EU-Mitgliedsstaat zugelassenes Modell ist demnach auch in allen anderen EU-Ländern als zugelassen zu betrachten. Den Versuchen einzelner EU-Staaten, durch Nichtanerkennung der Zulassung bestimmten Steckern Modellen den Markteintritt zu verwehren, erteilte er eine Absage.



Batterie- und Umwelttestzentrum des VDE

Über alle Vorträge des Symposiums hinweg wurde deutlich, dass das Thema Sicherheit von Batterien von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Elektromobilität ist. Das Batterie- und Umwelttestzentrum des VDE in Offenbach ist hierfür ein wichtiger Baustein in Deutschland. Auf mehr als 50 hochmodernen Einrichtungen können Lithium-Ionen-Akkus für Elektrofahrzeuge auf Sicherheit und Dauerfestigkeit getestet werden. Die Prüfstände sind so dimensioniert, dass sie auch Lkw-Batterien mit bis zu 400 Kilogramm Gewicht inklusive Befestigungsmaterial und Abmessungen von bis zu 120 mal 120 Zentimetern aufnehmen können. Das Zentrum steht Automobilherstellern und Zulieferern, aber auch Forschungsinstitutionen und Behörden als Dienstleister zur Verfügung.

Herz des neuen Prüfzentrums ist eine Anlage, in der das Batterieverhalten bei besonders schweren Unfällen untersucht werden kann. Dazu gehört ein Fallturm, in dem die zu untersuchende Batterie in bis zu zehn Meter Höhe aufgehängt und dann ausgeklinkt wird. Beim anschließenden Aufprall auf einen auf dem Betonfundament liegenden simulierten Laternenpfahl erreicht der Akku eine Endgeschwindigkeit von rund 50 Kilometer pro Stunde. Er darf, um die Prüfung zu bestehen, anschließend nicht in Brand geraten. Der Test wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gefilmt und ermöglicht den VDE-Ingenieuren so eine detaillierte Auswertung. In einem weiteren Gebäudeteil können Batterien mit definierten Kräften gequetscht oder durch das Eindringen eines Metaldorns zerstört werden. Die in verschiedenen Industrienormen festgelegten Testkriterien – zum Beispiel die Eindringgeschwindigkeit des Dorns – werden bei diesen Prüfungen exakt eingehalten.

Nicht nur die Sicherheit, sondern auch die Langzeitstabilität von Traktionsbatterien untersucht der VDE in seinem neuen Testzentrum. Spezielle Prüfstandsaufbauten erlauben es, alle Fragen zu beantworten, die über die Lebensdauer der Batterie entscheiden: Ist die Batterie ausreichend gegen Spritzwasser oder eindringenden Staub geschützt? Halten die verwendeten Kunststoffe auch bei längerer Einwirkung von UV-Strahlung? Korrodieren Bauteile bei einem hohen Salz- und Feuchtigkeitsgehalt der Luft? Wie verhält sich eine Batterie bei minus 70 Grad Celsius? Und welchen Einfluss hat ein Temperaturschock von bis zu 24 Kelvin je Minute auf die Dauerfestigkeit? Wie verhält sich die Batterie beim Transport in der Luft unter Unterdruckbedingungen?



Mechanische Belastungen, wie sie im Fahrzeug durch schlechte Straßen auftreten, werden mit einem großen Schwingungsprüfstand simuliert. Die Batterie ist bei diesem Test Kräften von bis zu 120 Kilonewton (entspricht 12 Tonnen) ausgesetzt, deren Richtung in Sekundenbruchteilen wechselt. Um die Belastung zu maximieren, kann der Schwingungsprüfstand klimatisiert werden.

Als elektrochemischer Energiespeicher verändert sich das Verhalten eines Lithium-Ionen-Akkus im Lauf der Zeit, abhängig davon, wie oft und wie schnell er be- und entladen wurde. Die meisten Prüfeinrichtungen sind daher so gestaltet, dass die Batterie während der Tests ge- und entladen werden kann. So kann auch die Wechselwirkung der Batteriealterung mit anderen Einflussgrößen wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit untersucht werden. Für das jeweilige Prüfmuster optimal angeschlossene Zyklisierer laden und entladen die Prüflinge nach einem frei programmierbaren Rhythmus mit Spannungen von bis zu 1.000 Volt und Stromstärken bis zu 800 Ampere.

Das neue Batterie- und Umwelttestzentrum ist dabei nur ein Teil der Prüfeinrichtungen, mit denen der VDE die komplette Wertschöpfungskette der Elektromobilität abdeckt. Dazu gehören das Testen der Funktionsfähigkeit und Sicherheit von Elektromotoren. Die Strom-Spezialisten des VDE arbeiten bei der Typzulassung (Homologation) von Elektrofahrzeugen in einer strategischen Partnerschaft eng mit der GTÜ (Gesellschaft für Technische Überwachung) zusammen. Darüber hinaus zertifiziert der VDE auch Einrichtungen der Ladeinfrastruktur, von der elektrischen Sicherheit bis hin zur Funktionsfähigkeit des Kommunikationsprotokolls (Interoperabilität). Zur Verfügung steht auch ein hochmodernes Labor, in dem die elektromagnetische Verträglichkeit von Elektrofahrzeugen geprüft werden kann. In Planung befindet sich für die Erweiterung des Offenbacher Prüfzentrums eine befahrbare Klima-Prüfkammer, in der gesamte Fahrzeuge bis zur Größe eines Verteiler-Lkw auf Herz und Nieren untersucht werden.

Sicherheit steht im Offenbacher Prüfzentrum auch für das Bedienpersonal im Vordergrund. Gesteuert werden alle Prüfstände des Zentrums von einer zentralen Leitwarte aus, mit Video-, aber auch Wärmebildkameras kann das Geschehen auf dem Prüfstand verfolgt werden. Kritische Prüfstände sind mit elektrischen Türen versehen, die versehentliches Betreten des Prüfstandes im laufenden Betrieb verhindern. Die Lagerung der Batterien erfolgt in einem vom übrigen Prüfbetrieb abgesetzten Gebäudeteil. Eine



Notstromversorgung sorgt dafür, dass Steuerungs- und Sicherheitseinrichtungen jederzeit funktionsfähig bleiben.

Mit all diesen Aktivitäten leistet der VDE einen wichtigen Beitrag zu einem sicheren Gesamtsystem „Elektromobilität“ in Deutschland. Auch wenn das Automobil im Mittelpunkt des neuen VDE-Testzentrums steht, so können auch die Traktionsbatterien für andere Elektrofahrzeuge wie Pedelecs (Fahrräder mit elektrischem Hilfsmotor) untersucht werden. Dieses Marktsegment wächst stark und ist noch weitgehend unreguliert. Darüber hinaus können auch Batterien/Akkus für viele weitere Anwendungsfälle, wie beispielsweise Energienetze oder Elektrowerkzeuge, geprüft werden.

„Automobilhersteller müssen die Kompetenzen zur Elektromobilität ins eigene Haus integrieren.“

Keynote Ricky Hudi

Leiter Entwicklung Elektrik / Elektronik, Audi AG

Abstract

Am Beginn des Beitrags steht ein klares Bekenntnis von Audi zur Elektromobilität. Zwar werden rein batteriebetriebene Elektroautos in nächster Zeit noch ein Nischenmarkt bleiben. Dennoch wird die Technologie der Elektromobilität über Hybridfahrzeuge und durch Batterieantriebe mit Range Extendern an den Massenmarkt herangeführt.

Viele namhafte Autobauer haben bereits Programme zur Entwicklung massenmarkttauglicher Elektroautos aufgesetzt, so auch Audi. Es stellt sich die Frage, wie tief die Automobilhersteller in das Thema Elektrifizierung einsteigen sollen. Audi hat sich hier für die Ansiedlung aller Elektronikkompetenzen mit Batterieentwicklung, außer der eigentlichen Zellentwicklung, im eigenen Haus entschieden. Denn nur so lassen sich die komplexen Wechselwirkungen aus Zuverlässigkeit, Gewicht, Reichweite und Wirtschaftlichkeit des elektronischen Antriebs verstehen und in marktfähige Modelle überführen.

Der Beitrag schließt mit Betrachtungen zu zwei weiteren Megatrends der nächsten Dekade: der Vernetzung des Autos mit seiner Umwelt und dem pilotierten Fahren. Für beide Themen gibt es bereits erste Produkte am Markt, weitere stehen kurz vor der Markteinführung. Zusammen mit der



Elektrifizierung werden sie die individuelle Mobilität in den nächsten 10 bis 20 Jahren deutlich verändern und weiterentwickeln.

Einführung

Individuelle Mobilität bleibt nicht stehen, sondern wird sich auch in den nächsten zehn Jahren deutlich weiterentwickeln. Audi hat hierzu drei Megatrends identifiziert: Elektromobilität, Konnektivität und pilotiertes Fahren. Dies sind Megatrends, zu denen bereits heute erste Produkte am Markt verfügbar sind. In den nächsten Jahren werden wir in allen drei Bereichen deutliche Verbesserungen erleben.

Megatrend 1: Elektromobilität

Der Verbrennungsmotor, der seit etwa hundert Jahren gute Dienste leistet, wird nicht einfach von heute auf morgen durch Elektroantriebe ersetzt werden. Im Gegenteil, in ihm steckt auch weiterhin viel Optimierungspotenzial, das es zu heben gilt. Das Thema Elektromobilität dient hier als Katalysator für eine weitere Entwicklung, die in den letzten Jahren durch Konzepte wie die Hybridisierung noch einmal an Fahrt aufgenommen hat. Diese Weiterentwicklung wird voraussichtlich auch in den nächsten Jahren unser Bild vom Fahrzeug weiter pflegen. Hierzu zählen auch Themen wie die Nutzung von Leichtbaumaterialien im Automobil. Gleichzeitig ist festzuhalten: das Zeitalter der Elektromobilität ist ganz klar eingeläutet.

Hybrid als Brückentechnologie

Das Konzept mit der größten Praktikabilität und damit auch der größten Akzeptanz beim Endverbraucher ist derzeit der Hybridantrieb. Konkret sind es die Plugin-Hybride, die in den nächsten Jahren aus Sicht von Audi die größte Rolle spielen werden. Darunter versteht man Fahrzeuge mit Hybridantrieb, deren Batterien zusätzlich über das Stromnetz extern geladen werden können. Sie haben meist eine größere Batterie als reine Hybridfahrzeuge und stellen so eine Mischform zwischen Hybrid- und reinen Elektroautos dar. Diese Fahrzeugklasse wird in diesem und im nächsten Jahrzehnt große Verbreitung finden. Reine Batterieelektrofahrzeuge werden dagegen in den nächsten Jahren noch keine großen Stückzahlen erreichen und ein Nischenprodukt bleiben. Der Grund dafür sind die immer noch teuren Batterien, die außerdem oft noch nicht die gewünschte Reichweite ermöglichen.



Studie Audi R8 e-tron

Als Studie eines reinen Elektro-Sportwagens hat Audi bereits den R8 e-tron vorgestellt. Dieses Auto stellte am 26. Juni 2012 einen neuen Rundenrekord für rein elektrisch angetriebene Serienfahrzeuge auf der 20,8 Kilometer langen Nordschleife des Nürburgrings auf. In 8:09,099 Minuten umrundete der Audi R8 e-tron die Strecke. Die Batterie dieses Autos wiegt dabei über 500 kg und hat eine Kapazität von 49 KWh. Das reicht für eine Reichweite von über 200 km. Die Fahrleistungen des Autos entsprechen denen eines Supersportwagens. Für Audi ist eine solche Studie die Gelegenheit, das technisch machbare der neuen Antriebstechnologie auszuloten. Außerdem tragen solche Demonstratoren auch zur weiteren Akzeptanz und Bekanntheit von rein batteriegetriebenen Elektroautos bei.

Das andere Ende des Spektrums bildet die Studie Audi A1 e-tron. In diesem Auto kommt ein Wankelmotor als Range Extender zum Einsatz. Der elektrifizierte A1 ist ein Beispiel für ein Elektroauto in der Kompaktklasse.

Dreh- und Angelpunkt der Elektromobilität bleibt nach wie vor die Batterie. Bemühungen zur Standardisierung einiger Komponenten des elektrischen Antriebssystems zeigen bereits erste Ergebnisse. Dennoch ist es unabdingbar, dass der einzelne Automobilhersteller eigene Kompetenzen im Bereich Batterie und Hochvoltsystem aufbaut.

Aufbau der Kompetenzen zum Elektroantrieb bei Audi

Audi hat die Angebote aller weltweit führenden Hersteller von Li-Ionen-Zellen geprüft. Audi wird nicht selbst in die Zellfertigung einsteigen, sondern auch in Zukunft auf entsprechende Partner setzen. Ab der Zelle jedoch ist es für Automobilhersteller essenziell wichtig, das Batteriesystem selbst zu gestalten. Nur so kann es optimal an die Gegebenheiten im eigenen Fahrzeug angepasst werden. Ein weiterer Grund: Neben den Zellen spielen mit zunehmender Größe der Batterie die Kosten für Fertigung und Peripherie eine immer größere Rolle. Die Kostenfrage des Batteriesystems ist mit Blick auf eine breite Markteinführung von Elektrofahrzeugen sehr wichtig. Das Batteriesystem ist nach wie vor ein starker Kostentreiber bei Elektrofahrzeugen. Audi hat daher Kompetenzen zu Batteriesystemen vom Aufbau bis zur Fertigung im eigenen Haus aufgebaut. Dazu gehört ein umfassendes Verständnis von Aspekten wie dem Batteriemanagementsystem, den mechanischen Aufbauten oder der Kühlung. Allein über das Kühlsystem kann die Reichweite eines Elektrofahrzeugs um mehr als 20 Prozent erhöht oder verringert werden.



Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die optimale Integration der Batterie ins Fahrzeug. So kann die Optimierung der tragenden Strukturbauteile das Gewicht im zweistelligen Prozentbereich beeinflussen. Aus all diesen Gründen ist es für Automobilhersteller so wichtig, den Bereich Batteriesysteme in Zukunft als eigene Kernkompetenz aufzubauen. Audi hat aus diesem Grund im Mai 2012 ein eigenes Projekthaus Hochvolt-Batterie eröffnet. Am Standort Gaimersheim bei Ingolstadt arbeiten alle in die Hochvolttechnik eingebundenen Bereiche der AUDI AG gemeinsam an Lösungen für Batteriesysteme. So können im Batterie-Technikum Muster und Kleinserien von HV-Batteriesystemen gebaut werden. Ebenso wird im Projekthaus an Batterien für den Audi R8 e-tron und den Audi A1 e-tron gearbeitet. Die Arbeiten umfassen die Entwicklung sowohl von Hard- und Software für alle Bauteile. Audi arbeitet hier eng mit Panasonic zusammen. Das Unternehmen liefert die Batteriezellen.

Megatrend 2: Konnektivität

Das letzte Jahrzehnt war davon geprägt, das Fahrzeug in sich voll zu vernetzen. Dies ist mittlerweile in allen Fahrzeugklassen Realität, von der Kompakt- bis zur Luxusklasse. Module wie die Motor- und Getriebesteuerung oder die Klimaanlage sind heute über Bussysteme miteinander vernetzt. In diesem Jahrzehnt wird sich das Fahrzeug nahtlos mit seiner Umwelt vernetzen. Audi bündelt unter dem Begriff „Audi connect“ alle Aktivitäten zur Integration von Onlinediensten ins Fahrzeug, der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander (Car-to-Car) aber auch mit deren Umwelt (Car-to-Infrastructure) und dem pilotierten Fahren. Audi hat hierzu bereits erste Online-Dienste in alle Modellfamilien integriert. Ein Dienst liefert z.B. alle 3 Minuten hoch aktuelle Verkehrsinformationen über die eingebaute Mobilfunkschnittstelle. Das ist wesentlich aktueller als die bisher üblichen TMC-Rundfunksender alle 20 Minuten. Dabei wird die aktuelle Verkehrslage auch visualisiert: So stehen grün markierte Straßen für freie Strecken, gelbe für zähfließenden Verkehr und rote für Stau. Ein weiterer Dienst ist die visuell noch eingängigere Navigation mittels Google Earth oder Google StreetView.

Eine weitere Funktion ist die Bereitstellung eines WLAN-Hotspots im Auto. Bei Audi ist diese Funktion im A8 seit 2010 bestellbar und heute in allen Fahrzeugen erhältlich. Beifahrer und Passagiere im Fond des Fahrzeugs können sich mit ihren Endgeräten so bequem ins Internet einloggen. Bis zu acht Geräte sind anschließbar.



Mit Erscheinen des neuen Audi A3 im Herbst 2012 wird das Audi connect Portfolio noch einmal um Picture Navigation, Tankstelleninformationen und vieles weitere mehr erweitert. Die Vernetzung des Fahrzeugs ist also mittlerweile ebenfalls in der Premiumkompaktklasse angekommen und nicht mehr nur der Luxusklasse vorbehalten. Bisher war das Fahrzeug einer der am wenigsten vernetzten Bereiche des Lebens. Das ändert sich rapide.

Usability

Eine häufig gestellte Frage bei all dieser Konnektivität lautet: Lenkt das den Fahrer nicht ab? Audi hat darauf die Antwort gefunden, dass solche Funktionen nur zusammen mit einem optimalen eigenen Bedienkonzept ins Auto gebracht werden. Dieses Bedienkonzept setzt unter anderem auf Sprachbedienung und ablenkungsreduzierte Anzeigen. Diese Features werden im Audi MultiMedia Interface (MMI) gebündelt, welches außerdem ein über alle Audi-Modelle gleiches Bedienkonzept bietet. Ziel dieser Aktivitäten ist es, dem Kunden die gewünschten Informationen so einfach und so ablenkungsfrei wie möglich anzubieten.

Ein so eng ins Fahrzeug integriertes System steht auch nicht in Konkurrenz zu Geräten aus der Consumer-Elektronik wie Smartphones oder Tablets. Solche Geräte, die einfach am Armaturenbrett befestigt werden, lassen sich nicht ablenkungsfrei während der Fahrt bedienen. Es wird daher ein Nebeneinander solcher Systeme geben.

Hardware im Hintergrund

Diese Konnektivität verlangt natürlich auch hardwareseitig leistungsstarke Komponenten. Der Volkswagen-Konzern, zu dem Audi gehört, setzt sehr stark auf Modularität. Für den Bereich Konnektivität und Information sind hier zwei eigentlich sehr unterschiedliche Welten miteinander zu versöhnen. Zum einen die relativ langsamen Innovationszyklen der Automobilindustrie mit typischerweise fünf bis sieben Jahren Entwicklungszeit zwischen den Fahrzeuggenerationen. Zum anderen die schnelllebige Consumer-Branche mit Innovationszyklen von typischerweise ein bis zwei Jahren. Bei Audi heißt die Lösung „modularer Infotainment Baukasten“ (MIB). Alle sich schnell ändernden IT-lastigen Komponenten wie Software oder Connectivity werden auf ein hochintegriertes Multimedia Extension Board (MMX-Board) ausgelagert. Die Hardware für dieses Board wird dabei nicht mehr von einem klassischen First-Tier-Supplier geliefert, sondern von nVidia. Das ist ein Partner, der die Schnelligkeit der



IT-Welt vorlebt. Die Software dafür wird von der e.solutions GmbH, einem Joint Venture von Audi und Elektrobit Automotive, geschrieben.

Megatrend 3: Pilotiertes Fahren

Pilotiertes Fahren bedeutet unterstütztes Fahren. Das heißt, dass der Fahrer ähnlich wie der Pilot im Flugzeug immer die letzte Kontrolle hat. Das Auto bewegt sich ähnlich einem vom Autopilot gesteuerten Flugzeug selbständig, der Fahrer kann aber trotzdem jederzeit eingreifen. Das Fahrzeug wiederum soll den Fahrer bei seiner Aufgabe so gut wie möglich unterstützen, ohne dabei als störend empfunden zu werden. Das Ziel solcher Fahrerassistenzsysteme ist es, die Sicherheit und den Komfort für die Insassen zu erhöhen.

Eine Reihe von Fahrerassistenzsystemen ist bereits serienmäßig verfügbar. So zum Beispiel im neuen Audi A3, der sich gerade in der Markteinführung befindet. Mit Ausnahme eines Nachtsichtsystems und eines Head-up-displays hat dieses Modell in der Premiumkompaktklasse alle Fahrerassistenzsysteme, die es auch in der Luxusklasse (Audi A8) gibt. Zu den heute verfügbaren Systemen gehören: Active Lane Assist (Spurhalteassistent), Side Assist (Totwinkelassistent), Verkehrszeichenerkennung, gleitende Leuchtweitenregulierung, Adaptive Cruise Control (ACC) und Einparksysteme, etc.

Die Langzeitvision von Audi lautet: In Situationen, in denen der Fahrer nicht fahren will muss er auch nicht mehr fahren. Solche Situationen können ein Stau oder die Suche nach einem Parkplatz im Parkhaus sein. Dann soll der Fahrer in Zukunft das Auto selbständig fahren lassen können.

Projekt „Staupilot“

Derzeit arbeitet Audi an einem solchen Projekt unter dem Titel „Staupilot“. Gerät das Auto in einen Stau, so wird es dies zukünftig selbständig erkennen können. Die Grundlage für eine solche Entscheidung sind entsprechende Sensorsignale von Kameras und Verkehrsleitsystemen. Das Fahrzeug wird dann selbständig die Kontrolle übernehmen. Der Fahrer kann stattdessen die Zeit sinnvoll nutzen, zum Beispiel für ein Videotelefonat. Stop & Go-Verkehr, einscherende Fahrzeuge und verengte Fahrbahnen aufgrund von Baustellen werden vom System erkannt. Nach Auflösung des Staus übergibt das Fahrzeug die Kontrolle wieder an den Fahrer. Die ersten Versuchsträger dazu sind bereits auf den Straßen, dies ist also keine Science Fiction, sondern wird in absehbarer Zeit Realität sein. Zwar gab es bisher schon ähnliche Pilotprojekte, der



wesentliche Unterschied ist aber die jetzt erfolgte Miniaturisierung der notwendigen Hardware. Bisher waren auf dem Dach der Fahrzeuge große Kameras installiert und im Kofferraum entsprechende Rechnertechnik. Nachdem die prinzipielle Machbarkeit des pilotierten Fahrens seit längerem bewiesen ist, ist heute die große Herausforderung die Technologie großserientauglich zu machen.

Fazit

Die beschriebenen drei Megatrends werden die Entwicklung in der Automobilindustrie in den nächsten zehn Jahren prägen. Elektromobilität wird den Weg in den Massenmarkt in naher Zukunft über Hybridantriebe sowie Batterieantriebe mit Range Extendern finden. Für Automobilhersteller wird es in Zukunft von größter Bedeutung sein, eigene Kompetenz im Bereich Batteriesysteme und elektrifizierter Antriebsstrang aufzubauen. Unter diesen Rahmenbedingungen wird sich individuelle Mobilität in den nächsten Dekaden genau so verändern, wie es auch in den Dekaden des letzten Jahrtausends der Fall war.

Session 1: Batteriesysteme

Batteriepacks – System aus vielen Teilen und komplexen Wechselwirkungen mit dem Fahrzeug

Susanne Rothgang

Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen

Abstract

Batteriesysteme für Automobilanwendungen müssen immer eine Balance zwischen konkurrierenden Aspekten wie Leistung, Gewicht, Baugröße und Preis finden. Der Beitrag stellt einige Designmöglichkeiten für diese Aspekte vor (z.B. Zellart, Zellform). Es wird deutlich, dass die Auswahl einer guten Zelle zwar Voraussetzung für ein gutes Batteriesystem ist aber allein noch nicht ausreicht. Vielmehr beeinflussen auch die Topologie und Umsetzung die Effizienz des Entwurfs maßgeblich. Es wird auch auf die bei Li-Ionen-Akkus nötigen aufwändigen Kühlsysteme eingegangen, welche die Batteriepacks sicher machen, aber auch ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor sind.



Einführung

Die Akzeptanz der Elektromobilität wird wesentlich abhängen von Faktoren wie der Reichweite, der Ladegeschwindigkeit und der Sicherheit des elektrischen Antriebs. Diese Aspekte wiederum werden maßgeblich von den Eigenschaften des Batteriesystems bestimmt. Die Erforschung und Entwicklung von Batteriepacks für die Elektromobilität ist daher weiter in vollem Gange, denn die bisher verfügbaren Batterien sind meist für stationäre Anwendungen optimiert. Batteriesysteme für Automobilanwendungen sind aber immer ein Kompromiss aus den in der Automobiltechnik wesentlich härteren Faktoren Leistung, Gewicht, Baugröße und Preis. Im Folgenden werden verschiedene Designmöglichkeiten vorgestellt mit denen Batteriepacks je nach Anforderung auf einige dieser Aspekte hin optimiert werden können.

In den folgenden Betrachtungen geht es ausschließlich um Lithium-Ionen-Akkus, da sie derzeit die relevanteste Batterieart für die Elektromobilität sind. Dies ist begründet in den bekannten Vorteilen wie hoher Leistungsdichten, kompakter Abmessungen, hohem Lade- und Entladungswirkungsgrad sowie hoher Zyklenfestigkeit. Gleichzeitig hat diese Batterieart aufgrund des reaktionsfreudigen Zellmaterials besondere Sicherheitsanforderungen und braucht ein gutes thermisches Management.

Drei Schritte im Batteriepackdesign

Beim Batteriepackdesign werden drei Phasen unterschieden: die Vorfeldphase, die Phase der Systemauslegung und schließlich die Phase Produktion und Betrieb (Abbildung 1). In der *ersten Phase*, der Vorfeldphase, sind zunächst grundsätzliche Entscheidungen zur benötigten Batteriegröße, der Auswahl der Zellchemie und der Auswahl des Zelltyps zu treffen. In der *zweiten Phase* erfolgt die eigentliche Systemauslegung. Hier sind Aspekte wie das Schaltungskonzept, die Zellverbinder sowie die Anschlüsse zu bearbeiten. Aber auch Sicherheitsaspekte wie Schütze, Vorladungen und Sicherungen sowie das thermische Management gehören dazu. Die Phase wird mit einem speziell auf die Anwendung angepassten Batteriemanagementsystem abgeschlossen. Die *dritte Designphase* bilden Überlegungen zu Produktion und Betrieb. Hier wird überlegt wie das Batteriepack aufgebaut und geprüft werden kann. Auch Wartungsaspekte spielen hier eine Rolle.

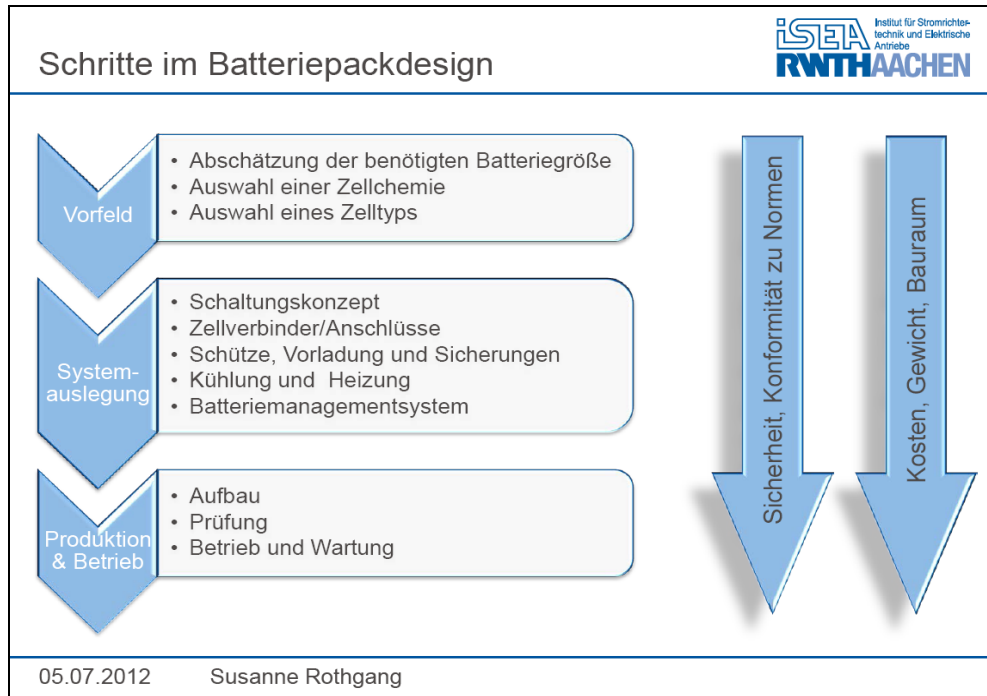


Abbildung 1: Drei Phasen im Designprozess für Batteriepacks

Die Entwicklungsarbeiten während aller drei Phasen sind entsprechend geltender Normen und Gesetze durchzuführen. So dürfen beispielsweise nur geeignete Zellmaterialien eingesetzt werden und es sind gewisse Mindestabstände zwischen elektrisch leitfähigen Komponenten einzuhalten.

Es reicht also nicht aus, einfach nur die besten Batteriezellen erforschen zu wollen. Das Design guter Batteriepacks ist ein komplexer Prozess, bei dem die für den jeweiligen Einsatzzweck optimale Kombination aus den genannten Einflussfaktoren entscheidend ist.

Wechselwirkungen von Designfaktoren

Um die Wechselwirkungen verschiedener Designfaktoren deutlich zu machen, werden im Folgenden die Aspekte Baugröße und Einsatzszenario näher betrachtet.

Baugröße

Zur Ermittlung der nötigen Batteriegröße ist als erstes der mittlere Tagesenergieverbrauch im Elektrofahrzeug festzustellen. Im hypothetischen Fall eines zu elektrisierenden Kleinbusses kann beispielsweise von 120 kWh pro Tag ausgegangen werden. Mit der derzeit



verfügbaren Batterietechnologie würde das einem Volumen von mehr als 850 l und einem Gewicht von mehr als 1,1 t entsprechen. Bei einem typischerweise zulässigen Gesamtgewicht von ca. 5,5 t kommt das Elektrisierungsvorhaben schnell an seine Grenzen – der Fahrzeugentwickler müsste sich nach einem alternativen Vorgehen umsehen. Die generelle Herausforderung für Batteriesysteme in der Elektromobilität lautet, dieselbe Tagesreichweite bei geringerem Gewicht und geringerer Baugröße zu ermöglichen, was sowohl durch Neuerungen in der Zellchemie als auch durch innovative Betriebsstrategien mit Schnellladephasen erreicht werden soll. Daran arbeiten Batterieforschung und Fahrzeugentwickler weltweit.

Einsatzszenario

Für rein batteriebetriebene Fahrzeuge sind Hochenergiezellen gefordert, um die benötigte Reichweite zu erhalten (**Abbildung 2**). Für Hybridfahrzeuge und andere Schnellladungsszenarien kommen dagegen eher Hochleistungszellen in Frage. Das Einsatzszenario wiederum beeinflusst das Anforderungsprofil zu Energieverbrauch, Peak und mittlerer Leistung.

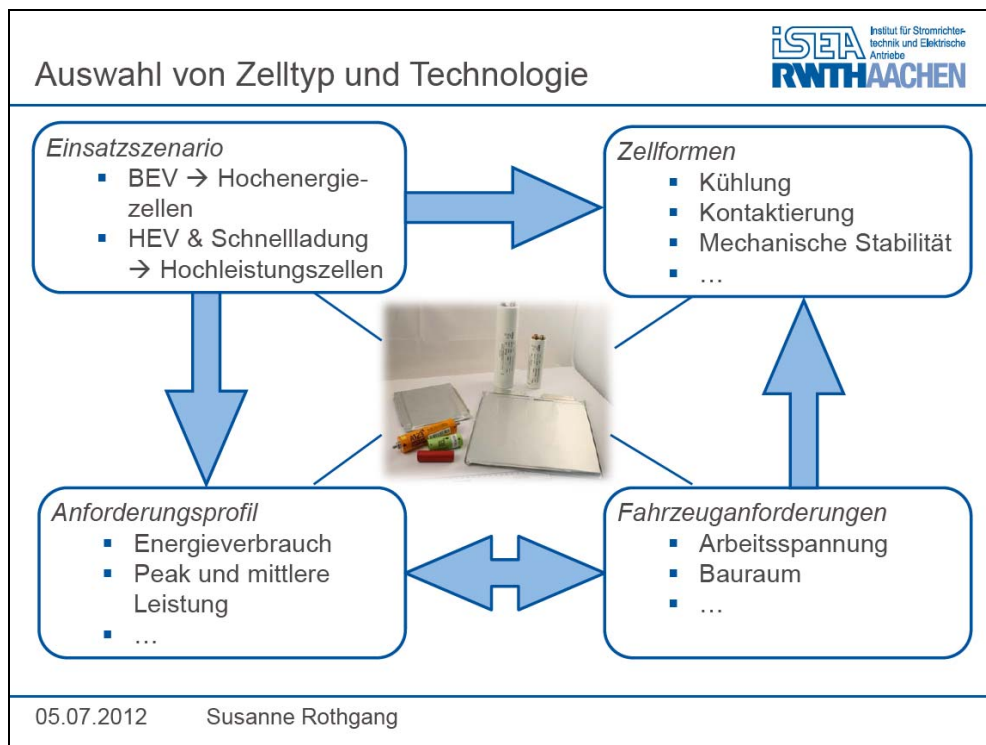


Abbildung 2: Wechselwirkungen von Designfaktoren



Diese Aspekte interagieren wiederum stark mit den Fahrzeuganforderungen wie Arbeitsspannung und realisierbare Baugröße. Die bisher genannten Faktoren zusammen haben Auswirkungen auf die Auswahl der Zellformen. Derzeit sind drei Zellformen verfügbar. Zum einen Rundzellen – hier sind Anode, Separator und Kathode aufgerollt und in einem zylindrischen Gehäuse aus Aluminium eingefügt. Die zweite Zellart sind prismatische Zellen. Sie bestehen aus flachen Wickeln in einem rechteckigen Aluminiumgehäuse. Schließlich gibt es noch die Pouch- oder Coffeebag-Zelle. Hier sind die einzelnen Lagen des Aktivmaterials gestapelt oder gefaltet und in einer flexiblen Aluminiumverbundfolie verpackt. Die gewählte Zellform determiniert die einzusetzende Kühlung, die Kontaktierung und die mechanische Stabilität des Batteriepacks.

Sicherheitseinrichtungen zwischen Fahrzeug und Batterie

Die Sicherheit des Batteriesystems wird über Schütze und Sicherungen gewährleistet (**Abbildung 3**). Wichtig ist, dass die Schütze nicht nur vom Master des Batteriemanagementsystems geöffnet werden können, sondern auch direkt von Fahrzeugsystemen selbst. Das wird beispielsweise im Falle eines Unfalls genutzt, wenn der Airbag-Sensor auch die Schützen auslöst und so das Fahrzeug bis auf die Batterie selbst in sehr kurzer Zeit komplett spannungsfrei setzt.

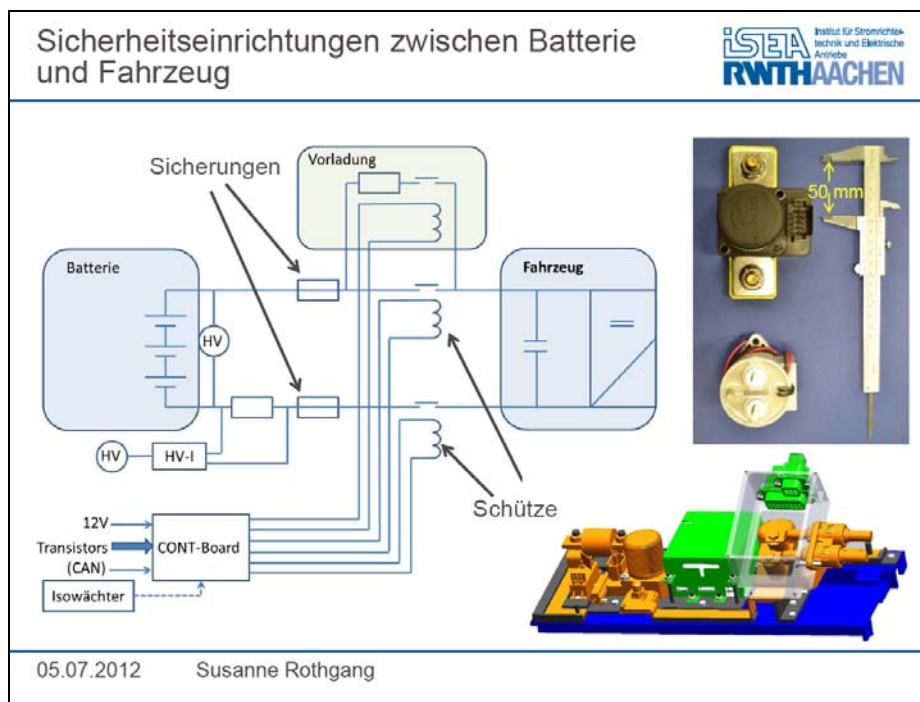


Abbildung 3: Sicherheitseinrichtungen zwischen Batterie und Fahrzeug



Schütze sind relativ groß und produzieren viel Wärme. Auf ihren Oberflächen herrschen typischerweise Temperaturen zwischen 50 und 60 °C. Deswegen muss in der Fahrzeugkonzeption genau geplant werden, wo diese im Batteriepack eingebaut werden. Die Abführung der thermischen Energie muss in jedem Fall gewährleistet sein. Auch die Sicherungen dürfen nicht zu nah an den Schützen positioniert werden, da diese in der Regel als Schmelzsicherungen ausgelegt sind und dadurch ihre Auslösecharakteristik verfälscht wird.

Gewichtsanteile im Batteriesystem

Betrachtet man die Anteile der einzelnen Komponenten eines Batteriepacks an dessen Gesamtgewicht so zeigt sich, dass die Zellen in der Regel etwa 70 Prozent des Gesamtgewichts ausmachen. Die drei nächstgrößeren Baugruppen sind die Kühlung, das Gehäuse und die Zellkontaktierung (Abbildung 4).

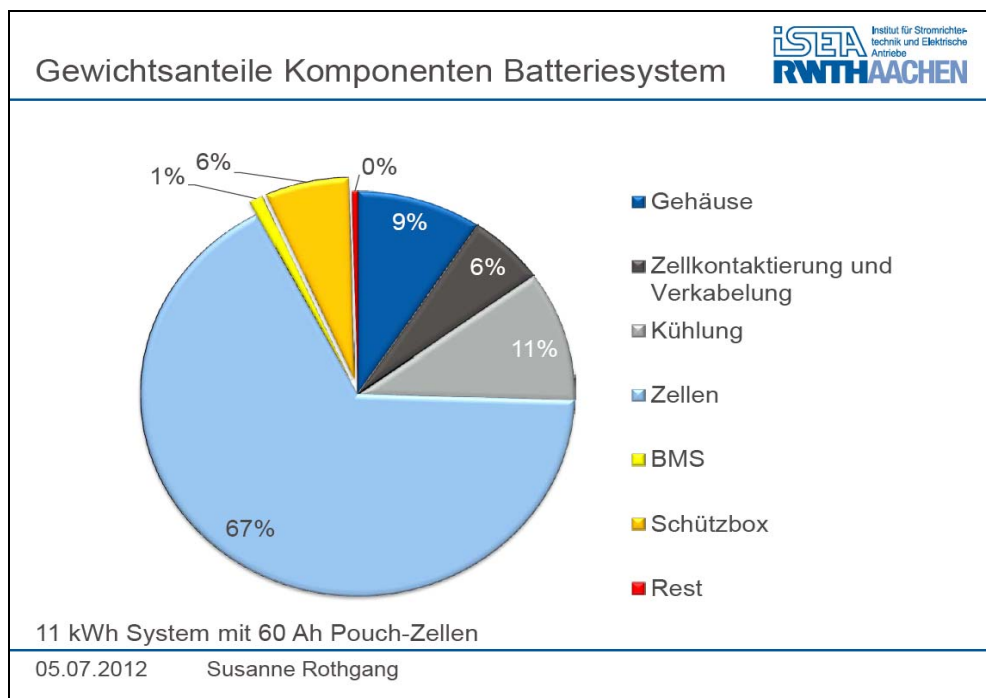


Abbildung 4: Gewichtsanteile eines typischen Batteriesystems

Bei serieller Ausführung des Packs können Gehäuse und Zellkontaktierung gewichtsmäßig sicherlich optimiert werden, zum Beispiel durch ein verschweißen der Ableiter. Die Komponenten Schützen und Batteriemanagementsystem (BMS) können dagegen nicht gewichtsoptimiert werden. Dies ist ein wichtiger Designaspekt. Denn wird



die Batterie auf mehrere Systeme verteilt, so sind diese Komponenten mehrmals einzubringen. Diese notwendige Redundanz erhöht dann das Systemgewicht.

Auslegung des Kühlsystems

Kühlsysteme werden sowohl auf der Zellebene als auch der Packebene eingesetzt (**Abbildung 5**). Auf der Zellebene ist zunächst die Anbindung an das Kühlsystem zu konzipieren. Voraussetzung dafür ist eine sehr regelmäßige Kontaktierung. Jegliche Unebenheiten auf der Zelle müssen ausgeglichen werden. Für optimale thermische Leitfähigkeit ist daher die Einbringung eines Interfacematerials nötig. Das Material muss sowohl über sehr gute thermische Leitfähigkeit als auch gute elektrische Isolation verfügen – eine Anforderung, die nur wenige Materialien gut erfüllen.

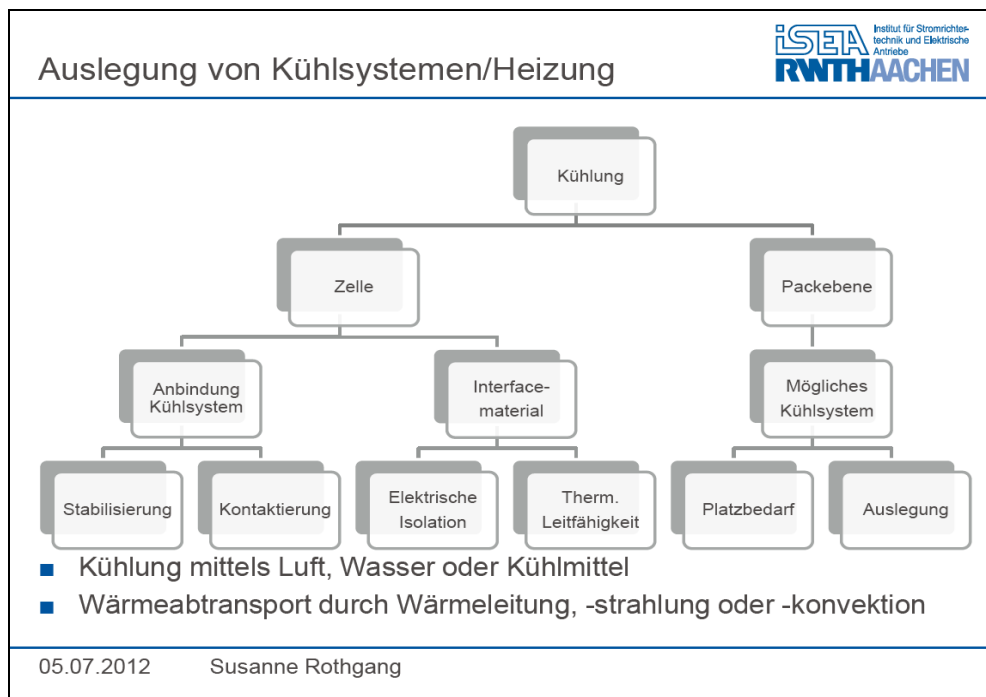


Abbildung 5: Aspekte der Kühlsysteme von Batteriepacks

Auf Packebene ist ein geeignetes Kühlsystem auszuwählen. Prinzipiell sind Aggregate basierend auf Luft, Wasser oder Kühlmitteln verfügbar. Der Wärmeabtransport kann dabei durch Wärmeleitung, -strahlung oder -konvektion erfolgen. Ein wichtiges Auswahlkriterium bei Automobilanwendungen ist der Platzbedarf. Bei den verbreiteten Flüssigkeitskühlsystemen muss zum Beispiel Platz für die Pumpe mit eingeplant werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass ein gutes thermisches



Management bei Li-Ionen-Akkus sehr wichtig ist. Gleichzeitig können aufwändige Kühlsysteme die Kosten des Batteriepacks stark nach oben treiben.

Fazit

Das Design guter Batteriepacks für die Elektromobilität verlangt immer eine Vielzahl gut durchdachter Entscheidungen um die verschiedensten Aspekte wie Zuverlässigkeit, Kosten, Gewicht und Bauraum in ein günstiges Verhältnis zu bringen. Die Auswahl einer guten Zelle ist dabei Voraussetzung, führt allein aber noch nicht zu einem optimalen Batteriesystem. Vielmehr beeinflussen auch die Topologie und Umsetzung die Effizienz des Entwurfs maßgeblich. Schließlich sind bei Li-Ionen-Akkus immer auch aufwändige Kühl- und Sicherheitssysteme nötig. Diese können aber auch die Kosten massiv nach oben treiben.

Batterie Recycling – ein nachhaltiger Beitrag zur Ressourcenschonung und Versorgungssicherheit wertvoller Batteriematerialien

Frank Treffer

Umicore AG & Co. KG

Abstract

Ziel des Recyclings ist es, Wertstoffe im Wirtschaftskreislauf zu halten. Anders als bei konventionellen Automobilen, wo ein wirkungsvolles Recyclingkonzept erst nach und nach erarbeitet wurde, bietet die beginnende Elektromobilität die Chance auf eine frühzeitige Konzeptionierung einer solchen geschlossenen Wertstoffkette. Der Beitrag stellt einen dreistufigen Recyclingprozess für Lithium-Ionen Akkus für die Elektromobilität vor. Dieser besteht aus den Schritten Sammlung, Vorbereitung und Recycling. Im öffentlich geförderten Projekt LiBRi hat die Umicore AG diesen Prozess zusammen mit weiteren Partnern entwickelt und in einer Pilotanlage in Hoboken (Belgien) industriell umgesetzt. Die technischen Möglichkeiten recycelte Materialien von Altbatterien wieder als Grundlage neu produzierter Batterien zu verwenden existiert bereits. Der Beitrag zeigt auch, für welche Wertstoffe das Recycling auch wirtschaftlich sinnvoll ist.



Einführung

Unter Batterierecycling wird die stoffliche Wiederverwertung von Batterien und Akkumulatoren zur Gewinnung der darin enthaltenen Elemente wie Lithium, Cobalt oder Eisen verstanden. Das Ziel des Batterierecyclings ist es, diese Wertstoffe im Wirtschaftskreislauf zu halten.

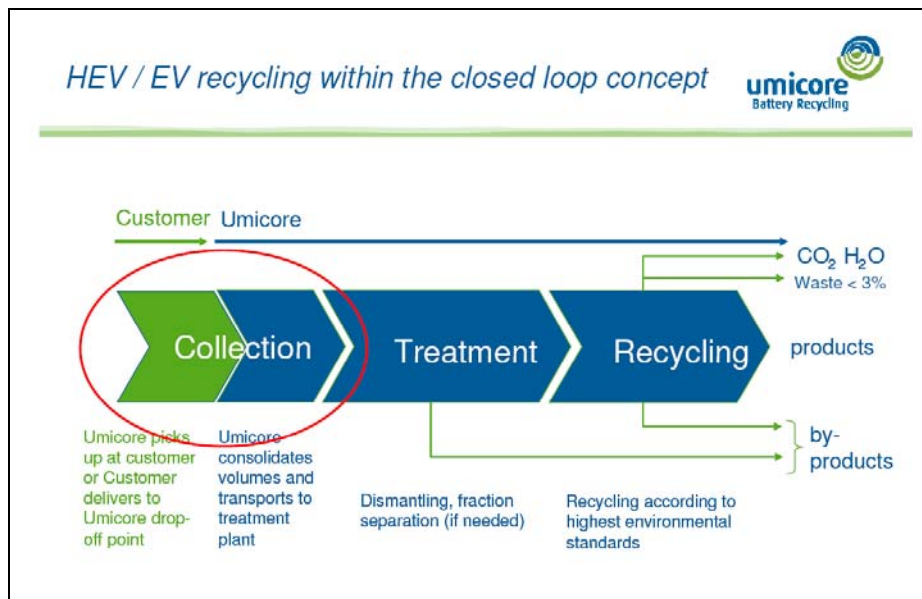


Abbildung 6: Die drei Schritte des Recyclingprozesses (Grafik: Umicore AG & Co. KG)

In diesem Beitrag wird ein mittlerweile praxiserprobtes Vorgehen zum Recycling von Lithium-Ionen-Akkus aus Hochvoltanwendungen in der Elektromobilität vorgestellt. Das vorgestellte Verfahren eignet sich dabei sowohl für die Akkus reiner Elektrofahrzeuge als auch von Hybridfahrzeugen. Ähnlich wie beim Recycling anderer Wertstoffe besteht der Prozess aus den drei Schritten:

1. Sammeln
2. Vorbereiten / Aufbereiten
3. Recyceln

Das Sammeln umfasst alle notwendigen Aktivitäten, die Batterien am Ende ihrer Lebensdauer dem Recyclingprozess zuzuführen. Anschließend werden im Arbeitsschritt Vorbereiten / Aufbereiten die Batterien in ihre einzelnen Komponenten und Materialfraktionen zerlegt. Im eigentlichen Recyclingschritt werden dann die besonders interessanten Mineralien wie



Cobalt und Nickel zurückgewonnen. Diese stehen dann wieder als Ausgangsmaterialien für neue Batterien zur Verfügung.

Sammeln

Am Anfang des Prozessschrittes „Sammeln“ stehen die Fahrzeugakkus, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben (EOL-Produkte). Auch wenn dieser Schritt zunächst banal erscheinen mag, so hat er doch im Gesamtprozess „Recycling“ entscheidende Bedeutung. Denn die Gesamteffizienz des Recyclingprozesses wird vom Teilschritt mit der geringsten Effizienz gesteuert – das ist heutzutage immer noch das Sammeln der zu recycelnden Produkte. Hier geht dem gesamten Wiederverwertungsprozess das meiste Material verloren. Die danach folgenden technologischen Prozesse (Sortieren, Demontieren, Vorbereiten, Recyceln) sind dagegen technologisch heute so ausgereift, dass sehr hohe Wirkungsgrade von typischerweise 80 bis 95 Prozent erreicht werden.

Für das Batterierecycling bei Elektrofahrzeugen heißt das: bereits jetzt, bevor ein echter Massenmarkt für diese Autos entsteht, sollten schon Mechanismen entwickelt werden, mit denen möglichst alle gebrauchten Batterien der Aufarbeitung zugeführt werden können. Hier müssen Industrie und Politik frühzeitig gemeinsame Konzepte entwickeln.

Bei den konventionellen Automobilen wurde dies nicht von Anfang an mit bedacht. Das hat zur Folge, dass heute viele Gebrauchtwagen den Wirtschaftskreislauf irgendwann verlassen, in dem sie zum Beispiel nicht mehr nachvollziehbar weiterverkauft werden. Die Einführung der Elektromobilität bietet hier eine neue Chance, diese Konzeptkette von vornherein mit zu schaffen und so effektive Strukturen aufzubauen.

Vorbereiten

Nachdem die Alt-Akkus gesammelt wurden müssen sie als nächstes für das eigentliche Recycling vorbereitet werden. Wichtige Optimierungen für diesen Prozessschritt wurden im Rahmen des LiBRi-Projekts (Lithium-ion Battery Recycling initiative) erforscht. Dieses Forschungsprojekt lief von 2009 bis 2011 und wurde von der Umicore AG koordiniert. Weitere Projektpartner waren die Daimler AG, das Öko-Institut und die TU Clausthal (Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik). Das Projekt LiBRi wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert. Ziel war die Entwicklung eines realisierbaren



Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge.

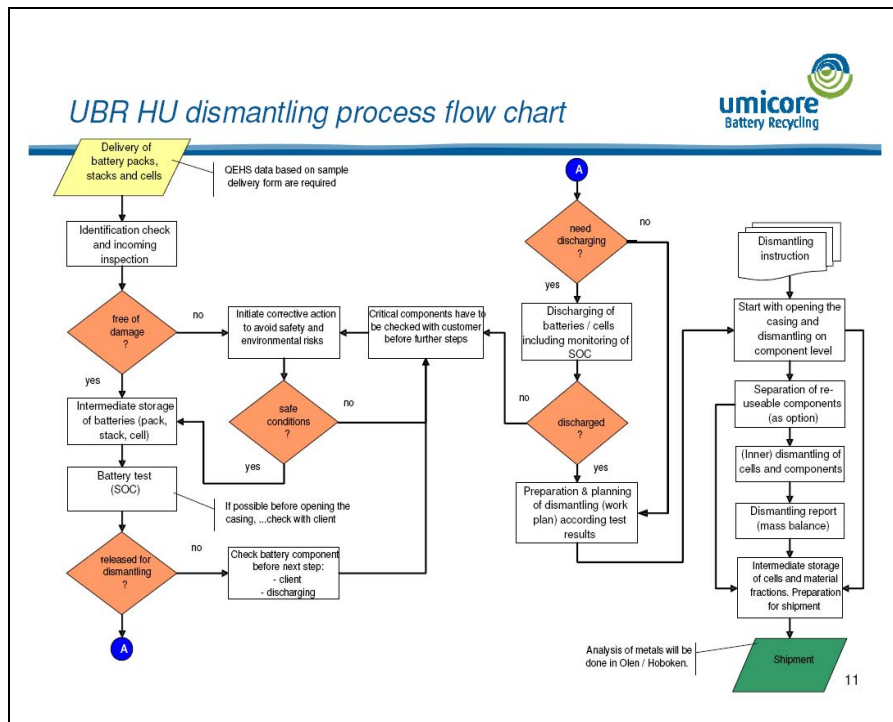


Abbildung 7: Im Rahmen des LiBri-Projekts entwickelter Flowchart zur Demontage eingehender Li-Ionen-Akkus. (Grafik: Umicore AG & Co. KG)

Das Projekt betrachtete die gesamte Prozesskette, angefangen vom demontagegerechten Batteriedesign über Logistikprozesse (Sammlung, Transport, Lagerung) und Demontage bis hin zur Rückgewinnung der Wertstoffe. Umicore beschäftigte sich vor allem mit der Entwicklung und Installation einer Pilotanlage für die Demontage von Li-Ionen Batteriesystemen für Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge. Auch logistische Aspekte waren Teil des Arbeitspakets. Mit dem Aufbau und Betrieb einer Versuchsanlage für die Batteriedemontage und die Vorkonditionierung der Batteriematerialien wurde die Grundlage für eine spätere großtechnische Umsetzung von Recyclingprozessen gelegt.

Eine generelle Herausforderung ist die Fertigung der Akkus in verschiedensten Bauformen und verschiedensten Materialmischungen. Im Rahmen des LiBri-Projekts konnten hier aber in den letzten Jahren intensive Erfahrungen gesammelt werden, wie diese unterschiedlichen Bauformen optimal für das Recycling vorzubereiten sind.



Demontage der Batteriekomponenten

Zunächst ist das Batteriepack in seine einzelnen Komponenten zu zerlegen. Dazu gehören z.B. das Batteriemanagement- und das Kühlsystem. Mit diesem Arbeitsschritt sollen die einzelnen Zellpacks isoliert werden, denn sie sind der letztlich für das Recycling relevante Teil des Batteriepacks. Die einzelnen Zellen sind dabei in Modulen zusammengefasst, Module wiederum in Stacks.

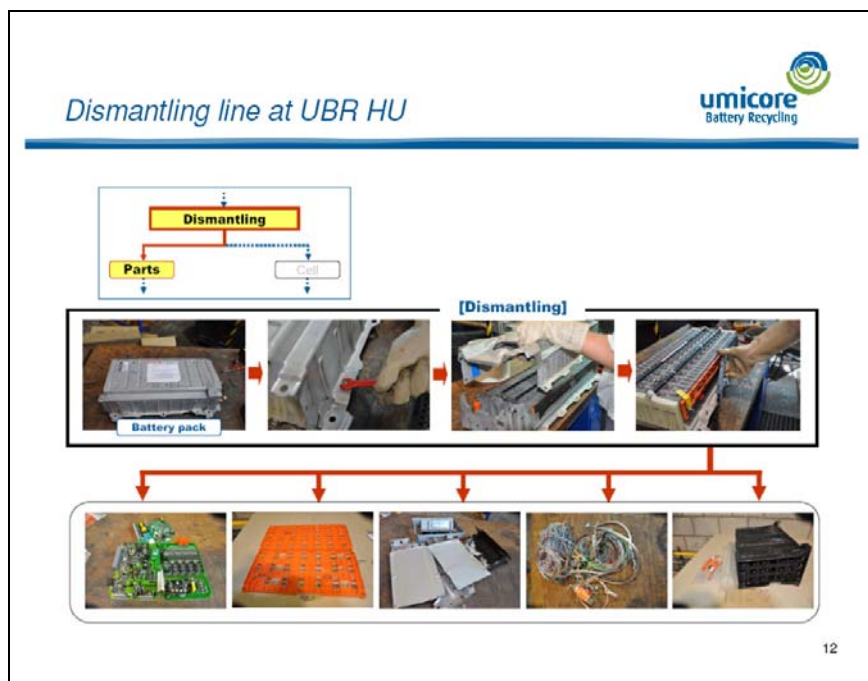


Abbildung 8: Das Zerlegen des Batteriepacks in die fünf Materialfraktionen
(Grafik: Umicore AG & Co. KG)

Die einzelnen Komponenten werden dann nach ihren Hauptmaterialien getrennt. Die typischen Materialfraktionen sind Elektronik, Compositmaterialien (z.B. bei Kontaktboards), Gehäuseabdeckungen, Kupferfraktion (inkl. Isolierungen) und die Kunststofffraktion. Auch diese Materialien sind für das Recycling relevant und werden vor dem Recycling des Zellmaterials separiert.

Demontage der einzelnen Zellen

Nach dieser vorbereitenden Trennung der Batteriekomponenten werden auch die einzelnen Zellmodule demontiert. Auf den so vereinzelteten Modulen kann jetzt auch die Spannung effizient reduziert werden. Es ist dabei nicht immer notwendig, die Batteriesysteme vollständig zu



entladen. Wenn die Systeme mechanisch intakt sind, kann es ausreichen, die Spannung durch mechanische Verfahren unter die 120-Volt bzw. 60-Volt-Grenze zu reduzieren. Voraussetzung für die Entscheidung zur Entladung ist eine zuverlässige Detektion der Unversehrtheit der Zellen und des Ladezustands (state of charge).

Am Ende all dieser Vorbereitungen werden die Zellen dann ohne weitere Modifikationen der Recyclinganlage zugeführt. Sie werden also nicht mechanisch zerstört o.ä., das Recycling erfolgt rein durch einen pyrometallurgischen Prozess.

Massentypisierungen / Massenbilanz

Bei reinen Elektrofahrzeugen entfällt zwischen 60 und 70 Prozent der Masse einer Zelle auf das reine Zellmaterial, und zwar über alle möglichen Batterietypen hinweg. Bei Batterien für Hybridfahrzeuge liegt dieser Anteil noch etwas höher, weil diese oft kein Kühlsystem benötigen. In beiden Fällen spielt also das reine Zellmaterial die größte Rolle beim Recyclingprozess. Hier sind eine Menge Ressourcen gebunden, deren Wiedergewinnung sich lohnt.

Recycling

Da die Recyclingprozesse der sonstigen Materialfraktionen bekannt ist, wird im Folgenden nur der Recyclingprozess der Zellen betrachtet. Die Umicore AG hat für diesen letzten Prozessschritt eine Pilotanlage in Hoboken (Belgien) aufgebaut. Sie hat eine Kapazität von 7.000 t pro Jahr. Im Vergleich mit heutigen großtechnischen Recyclinganlagen ist das relativ wenig. Die Kapazität wird aber als ausreichend für das erwartete Aufkommen in den nächsten vier bis fünf Jahren betrachtet. Die Anlage erlaubt auch in der aktuellen Dimensionierung schon jetzt einen praxisnahen Betrieb, bei dem viele neue Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Batteriematerialien werden dort pyrometallurgisch verarbeitet, also in einem Hochofenprozess eingeschmolzen. Es entstehen zwei Hauptausgangsströme: zum einen Schlacke (slag), zum anderen metallische Legierungen (alloys).

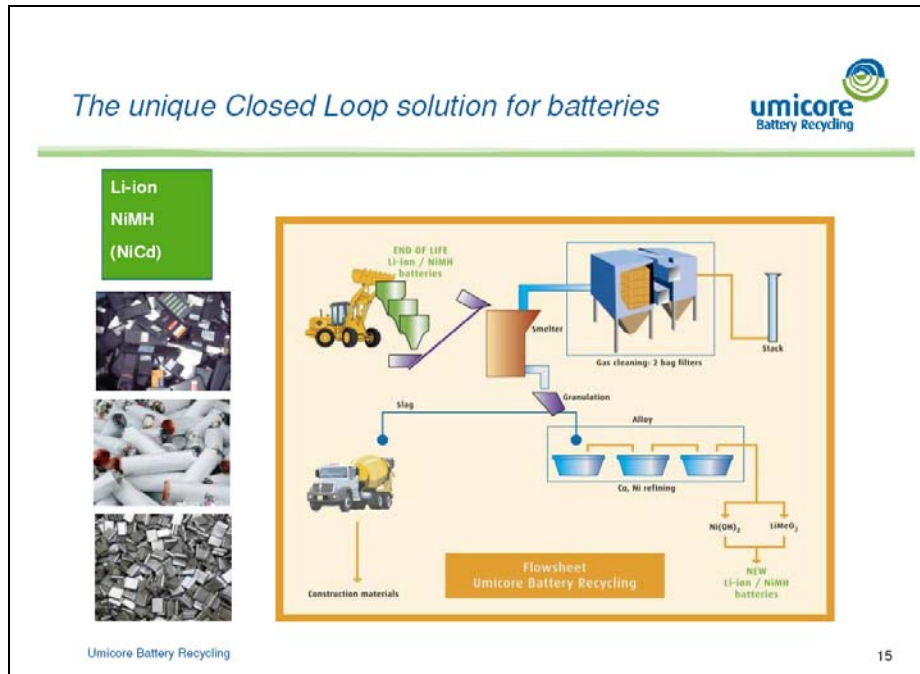


Abbildung 9: Am Ende des eigentlichen Recyclingprozess stehen zum einen Schlacke, zum anderen Metalllegierungen. (Grafik: Umicore AG & Co. KG)

Das Lithium ist in der Schlacke enthalten. Obwohl der technologische Prozess zum Recycling des Lithiums ausgereift ist, wird er derzeit aus wirtschaftlichen Gründen nicht genutzt. Der Prozess kann derzeit preislich nicht mit neu abgebautem Lithium konkurrieren. Das Lithium-Recycling dürfte erst dann wirtschaftlich interessant werden, wenn natürliches Lithium irgendwann knapp wird. Bis dahin bleibt es in der Schlacke gelöst. Die Schlacke wird in der Fertigbetonindustrie als Material genutzt.

Die Legierung enthält typischerweise Kupfer, Mangan, Nickel, Eisen und Cobalt. Ein Solvenzextraktionsverfahren kommt zum Einsatz, um die verschiedenen Mineralien zu separieren. Dabei werden zunächst die für die Gewinnung neuer Batterierohmaterialien uninteressanten Metalle Eisen, Mangan und Kupfer aus der Legierung getrennt. Zum Schluss bleiben nur noch Cobalt und Nickel übrig. Diese stehen dann am Ende des Prozesses wieder als Kathodenmaterial für neue Batterien zur Verfügung.

Schließlich bleibt auch ein kleiner Teil kritischer Materialien zur Deponierung übrig, derzeit ca. 2 bis 3 Prozent. Mittelfristig soll dieser Anteil auf möglichst null Prozent gesenkt werden. Der Schlüssel zu diesem Ziel ist



die Identifikation neuer Anwendungen für solche Materialien in der Industrie.

Fazit

Die technologischen Verfahren zum effizienten Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus Anwendungen der Elektromobilität existieren. Bis auf das Material Lithium sind sie auch wirtschaftlich interessant. Die zentrale Herausforderung in nächster Zeit ist die Schaffung einer Anreizstruktur zum Sammeln aller relevanten Alt-Akkus für den Recyclingprozess. Industrie und Politik sollten hier eng kooperieren. Dann lässt sich ein weitgehend geschlossener Kreislauf realisieren, bei dem recycelte Materialien von Altbatterien wieder zur Grundlage neuer Batterien werden.

Session 2: Hochvolt-Bordnetz

Elektrische Sicherheit als Basis für die Elektromobilität – Ganzheitliche Betrachtung der Sicherheit von E-Fahrzeugen

Wolfgang Hofheinz

Bender GmbH & Co. KG

Abstract

Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Risiko des Isolationsfehlers in der Elektromobilität. Beim Laden von Elektrofahrzeugen mit möglichen Isolationsfehlern kann es zum Auftreten höherer Fehlergleichströme als den normativ zulässigen DC 6 mA kommen. In einem solchen Fall könnte dann die vorgeschaltete Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) Typ A „erblinden“, da sich deren Ansprechzeit und Ansprechwert negativ verändert. Als Lösungsansatz bietet sich allstromsensitive Sensorik in Form einer spannungsabhängigen DC $\geq 6\text{mA}$ Fehlerstromüberwachung an. Eine solche allstromsensitive 6 mA Sensorik ist kostengünstiger als eine galvanische Trennung von Lade- und Hochvoltsystemen. Sie ist auch kostengünstiger als die Aufrechterhaltung eines ausreichend hohen Isolationswiderstands während der gesamten Lebensdauer des Elektrofahrzeugs.



Einführung

Isolationsfehler sind ein ernstzunehmendes Risiko in der Elektromobilität. Die beiden derzeit gängigen Wege, damit umzugehen, sind zum einen die galvanische Trennung und zum anderen der Einsatz von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) Typ B (**Abbildung 10**).

Varianten der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD)									
Stromart	Stromform	Typ AC	Typ A	Typ B	Typ B+	Abschaltzeiten VDE 0664			Zulässiger Auslösebereich
						1 x $I_{\Delta n}$	2x $I_{\Delta n}$	5 x $I_{\Delta n}$	
Max. Frequenz (Hz)		50/60 Hz	50/60 Hz	2 kHz	20 kHz				
Wechselfehlerstrom		X	X	X	X				$0,5 \dots 1 I_{\Delta n}$
Pulsierende Gleichfehlerströme (pos. oder neg. Halbwellen)		-	X	X	X				$0,35 \dots 1,4 I_{\Delta n}$
Angeschnittene Halbwellenströme		-	X	X	X	0,3 s	0,15 s	0,04 s	$90^\circ \text{el } 0,25 \dots 1,4 I_{\Delta n}$ $135^\circ \text{el } 0,11 \dots 1,4 I_{\Delta n}$
Halbwellenstrom bei Überlagerung mit glattem Gleichstrom von 6mA		-	X	X	X				max. $1,4 I_{\Delta n} + 6\text{mA}$
Glatte Gleichstrom		-	-	X	X				$0,5 \dots 2 I_{\Delta n}$

Abbildung 10: Varianten der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD)

Sehr verbreitet ist auch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (Residual Current Protective Device, RCD) vom Typ A. Bei ihr ergibt sich allerdings folgendes Problem: sie ist normativ für DC 6 mA zulässig. Es sind aber Situationen bei der Nutzung eines Elektromobils denkbar, bei denen ein höherer Fehlergleichstrom auftritt. Dies kann zum Beispiel durch Fehler im Fahrzeug bei der Ankopplung oder beim Aufladen der Fall sein. In einem solchen Fall könnte das vorgeschaltete RCD „erblinden“, da sich seine Ansprechzeit und der Ansprechwert negativ verändern.

Simulationsberechnung

Es wurde eine relativ einfache Simulation berechnet. Dabei wurden bestimmte Isolationswerte vorgegeben und bestimmte Ableitimpedanzen angenommen. Daraus ergeben sich Fehlerströme, die zu beachten sind. Als Ergebnis dieser Berechnungen zeigte sich, dass in jedem Fall für einen



Isolationswiderstand $R > 100 \text{ k}\Omega$ zu sorgen ist und das Gleichfehlerströme $I_{DC} < 6 \text{ mA}$ sein sollten.

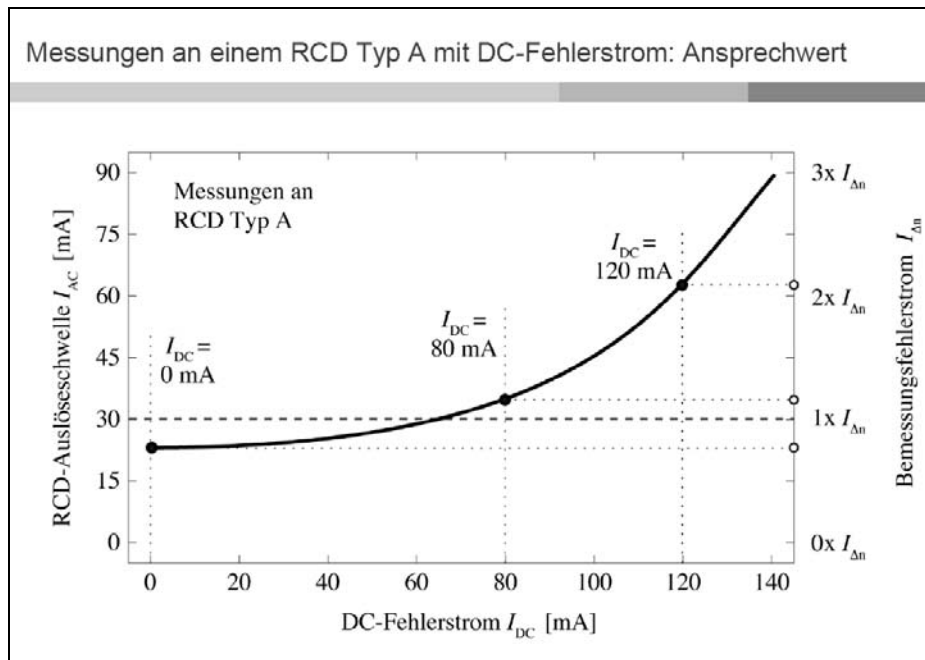


Abbildung 11: Messungen an einem RCD Typ A mit DC-Fehlerstrom: Ansprechwert

Aufgrund dieser Simulationsergebnisse erschien es sinnvoll, auch die Reaktion von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) genauer zu untersuchen. Es sollte deren Auslöseverhalten betrachtet werden, wenn mögliche Fehlergleichströme auftreten. Ein 30 mA RCD spricht normalerweise bei knapp unter 30 mA an. Wenn nun ein Gleichfehlerstrom dazukommt verändert sich die Auslöseschwelle deutlich nach oben. So zeigte sich, dass beispielsweise bei 120 mA Gleichfehlerstrom der gleiche FI-Schutzschalter erst bei etwa 60 mA reagiert (**Abbildung 11**). Dies ist eine deutliche Veränderung, die auch bei den Normungsaktivitäten zu berücksichtigen ist.

Es verändert sich aber nicht nur der Ansprechwert, sondern auch die Ansprechzeit. Üblicherweise bei $5x I_{\Delta n}$ spricht eine Fehlerstromschutzeinrichtung bei 40 ms an. Wenn Gleichstrom dazu kommt verlangsamt sich diese Ansprechgeschwindigkeit deutlich. Auch diese Problematik ist in der Normungsarbeit zu berücksichtigen.



Diskutierte Schutzkonzepte

Eine Lösungsmöglichkeit, die zur Zeit in den Gremien diskutiert wird, besteht darin, diese 6 mA-Grenze, die der normative Grenzwert des RCD Typ A ist, zu überwachen. Es gibt mittlerweile Möglichkeiten, diesen 6 mA Fehlergleichstrom zu detektieren. Alternativ werden Konzepte verfolgt, solche 6 mA-Sensorik in die Ladestation einzubauen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diese Sensorik im Fahrzeug selbst unterzubringen. Eine abschließende Entscheidung für eine dieser Varianten ist in den Gremien derzeit noch nicht gefallen.

Gleichfehlerströme haben ab ca. 10 mA messbare Auswirkungen auf die relevanten Schutzfunktionen von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) des Typ A. Diese bestehen zum einen in der Anhebung der Abschaltschwelle für Wechselfehlerströme, wenn ein zweiter Wechselstromfehler auf der Wechselstromseite auftritt. Zum anderen in einer Vergrößerung der Abschaltverzögerung bei Wechselfehlerströmen im Bereich der Abschaltschwelle.

Allstromsensitive Sensorik

Diese Beobachtungen führten zur Idee einer allstromsensitiven Sensorik in Form einer spannungsabhängigen $DC \geq 6 \text{ mA}$ Fehlerstromüberwachung. Eine solche Lösung ermöglicht die Beherrschung aller Fehlerkonstellationen auf der Wechsel- und Gleichspannungsseite bei gekoppelten Systemen im Ladevorgang. Sie ermöglicht auch die Sicherstellung der Funktion der weit verbreiteten vorgeschalteten Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) Typ A – gerade dies ist ein großer Vorteil.

Eine allstromsensitive 6 mA Sensorik ist dabei kostengünstiger als eine galvanische Trennung von Gleich- und Wechselstromsystemen im Elektrofahrzeug. Sie ist auch kostengünstiger als die Aufrechterhaltung eines ausreichend hohen Isolationswiderstandes während der gesamten Lebensdauer des Elektrofahrzeugs. Dies ist bedeutsam, weil die genaue Entwicklung des Isolationswiderstandes über einen langen Zeitraum derzeit empirisch noch nicht bekannt ist. Der Ansatz erscheint ökonomischer als der Einbau von einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) Typ B in die Ladestation. Die allstromsensitive 6 mA Sensorik kann entweder im Fahrzeug oder in der Ladestation eingebaut sein.



Fazit

Die Isolationsüberwachung des Hochvolt-Netzes im Fahrbetrieb gewährt einen Sicherheitsvorsprung. Beim Ladevorgang eines Elektrofahrzeuges können sowohl Gleich- als auch relevante Wechselfehlerströme auftreten. Etablierte Schutzoptionen sind möglich, aber teilweise aufwändig bzw. kostspielig. Die vorgestellte, spezielle DC 6 mA Schutzergänzung ist zuverlässig und wirtschaftlich.

Retten und Bergen von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben

Armin Gräter, BMW AG

Leiter Zentralteam Funktionssicherheit

Abstract

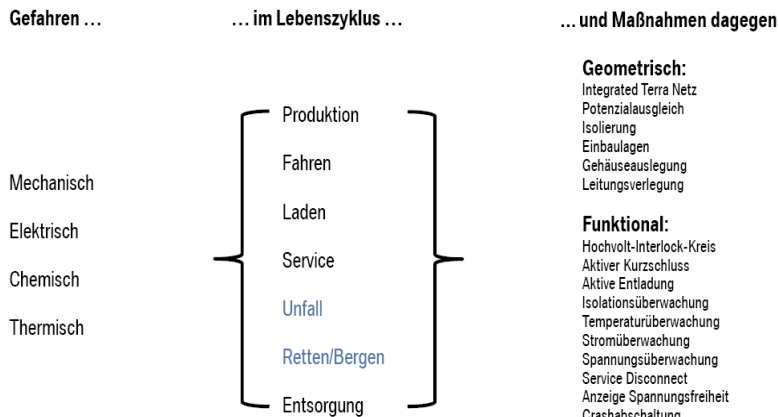
Im vorliegenden Beitrag werden zwei grundsätzliche Aspekte möglichst sicherer Elektrofahrzeuge vorgestellt. Zum einen sind dies Maßnahmen zu einer möglichst hohen funktionalen Sicherheit der Fahrzeuge. Diese lässt sich unter anderem durch Use Cases, Fehlerbäume und die Analyse des vorhersehbaren Fehlgebrauchs maximieren. Zum anderen ist das Verhalten des Fahrzeugs während und unmittelbar nach einem Unfall zu optimieren. Das Herstellen von Spannungsfreiheit im Wagen und das richtige Training der Rettungskräfte spielen hier eine zentrale Rolle. Durch die Kombination dieser Maßnahmen streben die Fahrzeughersteller das Erreichen eines mindestens genauso hohen Sicherheitsniveaus bei Elektrofahrzeugen als bei solchen mit Verbrennungsmotoren an.

Maßnahmen zur Erhöhung der funktionalen Sicherheit

Sicherheit ist für jeden Fahrzeughersteller ein zentrales Thema. Daher werden alle derzeit in der Entwicklung befindlichen Hybrid- und Elektrofahrzeuge bei BMW auch unter diesem Aspekt betrachtet. Ziel ist es, die Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang auf mindestens das gleiche Sicherheitsniveau wie bei konventionellen Fahrzeugen zu bringen.



2. SICHERHEITSKONZEPT. ZUSAMMENFASSUNG.



VDE Elektromobilität, BMW Group Armin Gräter, 06.07.2012

Seite 11

Abbildung 12: Integriertes Sicherheitskonzept für Elektrofahrzeuge im Überblick

Um dieses Ziel zu erreichen arbeiten bei BMW Experten aus den unterschiedlichsten Bereichen wie Fahrzeugtechnik, Elektrotechnik, Kundendienst und -beratung zusammen. Durch ihre Arbeit an einem ganzheitlichen Konzept (**Abbildung 12**) soll ein gemeinsames Sicherheitslevel geschaffen werden, welches allen Personengruppen, die mit dem Fahrzeug in Berührung kommen, den maximalen Schutz bietet.

Use cases

Dazu wird in einem ersten Schritt der gesamte Lebenszyklus des Autos unter dem Sicherheitsaspekt betrachtet. Es werden ganzheitliche „Use Cases“ beschrieben, also detaillierte Anwendungsfälle. Diese umfassen typischerweise folgende Phasen im Lebenszyklus: Entwicklung (auch Nacharbeit in Produktion), Produktion, Fahren, Laden, Werkstatt, Unfall und Entsorgung.

Das Auto soll also sowohl für den Arbeiter in der Produktion, den Mechaniker in der KfZ-Werkstatt, die Rettungsdienste und natürlich den Endverbraucher sicher sein.



Fehlerbäume

Grundlage dafür ist die Implementierung der Automobilnorm für funktionale Sicherheit ISO 26262. Mit der hier geforderten Risikoanalyse wird konkret und probabilistisch das Risiko für eine Person, die mit dem Fahrzeug in Berührung kommt, eingeschätzt. Aus dieser individuellen Bewertung werden dann geeignete technische Maßnahmen zu deren Prävention abgeleitet (**Abbildung 13**).

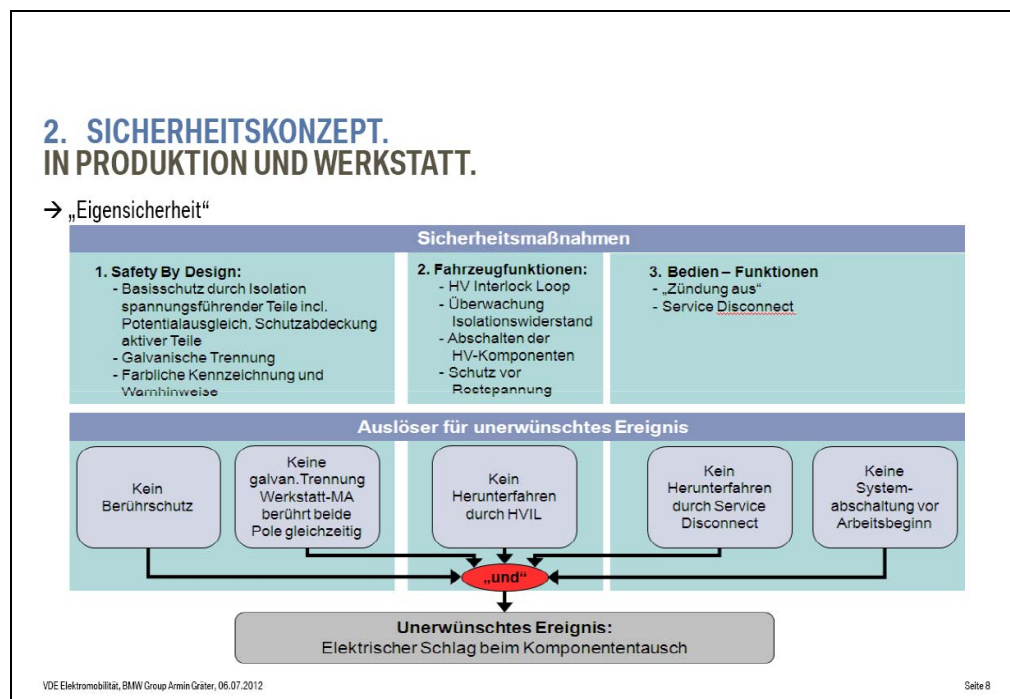


Abbildung 13: Beispiel für einen Fehlerbaum, hier für die Use Cases Produktion und Wartung

Mit einer Sicherheitsintegritätszahl ist anschließend zu zeigen, dass auch bei hohen Risiken die Präventionsmaßnahmen geeigneten Schutz bieten. Dieser Ansatz mit Fehlerbaum und Sicherheitsintegritätszahl entspricht dem üblichen Vorgehen in anderen Hochtechnologiebranchen wie Flugzeug-, Bahn- oder Medizintechnik. Ein allgemein akzeptiertes Sicherheitsniveau besagt, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit des kritischen Fehlers von 10^{-8} pro Stunde unterschritten werden muss.

Vorhersehbarer Fehlgebrauch – der „interne kritische Kunde“

In einem weiteren Schritt wird der mögliche Fehlgebrauch des Kunden antizipiert. Dazu werden Mitarbeiter mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung des jeweiligen Modells zu so genannten „internen kritischen



Kunden“ bestimmt. Sie kennen alle Stärken und Schwächen der Fahrzeugkonstruktion und prüfen die Auswirkungen typischen Fehlgebrauchs auf das Sicherheitsniveau. Mögliche Szenarien umfassen zum Beispiel:

- falsche Polung bei 24V Starthilfe
- Ausschütten von Flüssigkeiten
- Abnehmen von Verkleidungen

Vor dem Hintergrund des Produkthaftungsrechts wird die Grenze bei diesen Analysen ausdrücklich beim vorhersehbaren Fehlgebrauch gesetzt. Die Produkthaftung endet bei offensichtlichem Missbrauch oder krimineller Energie.

Die beschriebenen Instrumente Use Cases, Fehlerbäume und vorhersehbarer Fehlgebrauch zielen alle auf ein maximal sicheres Elektroauto ab. Dennoch werden auch solche Fahrzeuge in Unfälle verwickelt werden. Ihr Verhalten im Falle eines Unfalls und das richtige Verhalten der Rettungskräfte sind daher weitere Themen eines ganzheitlichen Sicherheitskonzepts.

Ansätze zur Unfallsicherheit bei Elektrofahrzeugen

Wesentliche Parameter der Unfallsicherheit werden bereits vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Die Norm ECE R 100 wurde beispielsweise speziell für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge entwickelt. Die gesetzlichen Regelungen lassen den Herstellern dabei meist verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten. Ob sich diese bewähren zeigen letztlich die vorgeschriebenen Crashtests, bei denen auch Elektroautos den Aufprall auf ein Hindernis mit 60 bis 80 km/h überstehen müssen.

Die zentrale Herausforderung beim Unfall mit Elektrofahrzeugen ist das Herstellen von Spannungsfreiheit. Im günstigsten Fall bleibt das Hochvoltbordnetz nach einem Unfall integer, also ohne Isolationsverletzung. Der gegenteilige Fall muss aber selbstverständlich mit konzipiert werden. Unter den deutschen Automobilherstellern hat sich hierzu der Konsens durchgesetzt, dass die Schnellabschaltung die richtige Gegenmaßnahme ist. Auch BMW hat sich für den Abschaltpfad entschieden. Dieser wird sogar deutlich konsequenter verfolgt, als er derzeit in den Gesetzen steht. Denn durch diesen Ansatz kann die eigentliche Gefahr nach einem Unfall optimal vermindert werden: das Risiko der Brandentwicklung (**Abbildung 14**).



3. UMGANG MIT LITHIUM-IONEN-BATTERIEN NACH UNFALL. PRÄMISSEN DER FAHRZEUGTECHNIK.

- **Hohe Eigensicherheit** von Li-Ion-Batterien bei Fahrzeugunfällen:
→ Bestätigung durch zahlreiche Fahrzeug-Crashversuche, die auch über gesetzliche und Verbraucherschutzanforderungen hinausgehen.
- **Gefahr des elektrischen Schlags:**
Prinzipbedingt nicht vorhanden.
→ Fahrzeug ohne Potential zur Erde.
→ Berührgefahr im Bordnetz mit Plus- und Minuspol in separaten Leitungen nur, wenn jeweils eine Leitung mit jeweils einer Hand berührt würden.
→ Benutzen von Werkzeug an beiden Pole: Strom wird immer durch das Werkzeug zum anderen Pol fließen, die Karosserie dabei potenzialfrei bleiben.
- **Brandgefahr:**
Untersuchungen, z.B. analog ECE R34 zeigen auch bei äußerer Brandeinwirkung (z.B. Reifenbrand) eine hohe Brandresistenz der Li-Ion-Batterien.

VDE Elektromobilität, BMW Group Armin Gräter, 06.07.2012

Seite 13

Abbildung 14: Sicherheitsaspekte von Li-Ionen-Akkus nach einem Unfall

Eine Möglichkeit zur Umsetzung der Spannungsfreiheit ist die Nutzung des Airbag-Sensors. Löst dieser aus, so wird ein Signal über eine direkte Leitung an die Batterie gebracht. Dort werden sofort die Schützen geöffnet. Hier werden derzeit Reaktionszeiten von 30 bis 50 ms erreicht. Das ist so schnell, dass zu diesem Zeitpunkt des Crashverlaufs noch keine Leitungen zerstört sind.

Eine weitere Sicherheitsfunktion ist der aktive Kurzschluss des Elektromotors um eine eventuelle Rückspeisung zu verhindern. Bewegt sich das Fahrzeug nach einem Crash weiter kann die permanent erregte Synchronmaschine auch nach der gerade beschriebenen Schnellabschaltung der Batterie Spannung produzieren. Damit wäre dann trotz geöffneter Batterie eine Stromquelle im Fahrzeug vorhanden. Der Ansatz des aktiven Motorkurzschlusses verhindert dies. Das Konzept ist so ausgelegt, dass der Ausrollweg von max. 100 m überbesteht. Auch diese Maßnahme ist sehr schnell, es werden Reaktionszeiten von unter 100 ms erreicht.

Eine letzte bewährte Maßnahme ist die aktive Entladung der Kapazitäten in den Hochvolt-Verbrauchern. Diese Maßnahme ist nicht ganz so schnell wie die beiden anderen, trotzdem werden noch gute Geschwindigkeiten im Bereich von unter einer Sekunde erreicht. Alle drei Crashfunktionen



Fazit

Das hier beschriebene Sicherheitskonzept basiert auf zwei grundlegenden Ansätzen. Zum einen der Produktion eines möglichst sicheren Elektrofahrzeugs. Die beschriebenen Aktivitäten wie Use Cases, Fehlerbäume etc. schaffen eine hohe funktionale Sicherheit der Fahrzeuge. Zum anderen steht das Verhalten der Fahrzeuge während und nach einem Unfall im Vordergrund. Der Fokus liegt hier auf der Herstellung von Spannungsfreiheit und dem Training der Rettungskräfte.

Natürlich müssen noch weitere Themen bearbeitet werden. Hierzu gehört beispielsweise der sichere Abtransport eines Fahrzeugs mit einer beschädigten Batterie. An der Lösung dieses Problems wird international intensiv gearbeitet. Dennoch können durch die konsequente Weiterentwicklung der beschriebenen Sicherheitskonzepte Elektrofahrzeuge sicher gebaut werden.

ECE-R 10 Revision 4 – eine neue Norm für EMV-Anforderungen an E-Fahrzeuge

Dr. Stephan Kloska

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH

Abstract

Durch Hochvoltbordnetze gibt es ganz neue Störquellen und Störsenken in den Fahrzeugen. Dies führt zu neuen Anforderungen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Zu den Störquellen gehören beispielsweise Frequenzumrichter mit sehr hoher Leistung, elektronische Schaltungen mit schnellen Transistoren oder die starken Ladegeräte. Die neueste Ausgabe der Regelung ECE-R 10 (Revision 4) definiert neue Anforderungen und Prüfaufbauten zum Test dieser Komponenten und Geräte. Insbesondere geht die Neuauflage auf die Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladesäule sowie auf Störphänomene während des Ladevorgangs ein. Mit der ECE-R 10, Rev. 4, werden erstmals diese neuen Störgrößen bei der Einholung von Typgenehmigungen für Elektroautos berücksichtigt.



Einführung

Elektrofahrzeuge führen zu neuen Anforderungen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Dies gilt insbesondere für rein batteriegetriebene Fahrzeuge. Das bisherige 12 V-Bordnetz war hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit bekannt und wird inzwischen gut beherrscht. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs halten jetzt aber eine Reihe neuer Komponenten Einzug ins Fahrzeug: Hochvolt-Motor, Frequenzumrichter, Hochvolt-Batterie, Ladegerät und Ladestecker. Besonders die Komponenten Ladegerät und Ladestecker stellen für die Fahrzeugwelt eine neue Herausforderung dar, da mit ihnen erstmals eine galvanische Verbindung in die Außenwelt existiert (**Abbildung 17**).

Neue Störquellen und Störsenken im Fahrzeug

Zu den neuen Störquellen im Fahrzeug gehören Frequenzumrichter mit sehr hoher Leistung. Weiter werden hohe Spannungen und Ströme für den Antrieb jetzt mit schnellen Transistoren geschaltet. Schließlich stellen auch die Ladegeräte eine starke Störquelle dar, da sie im Wesentlichen wie Schaltnetzteile arbeiten.

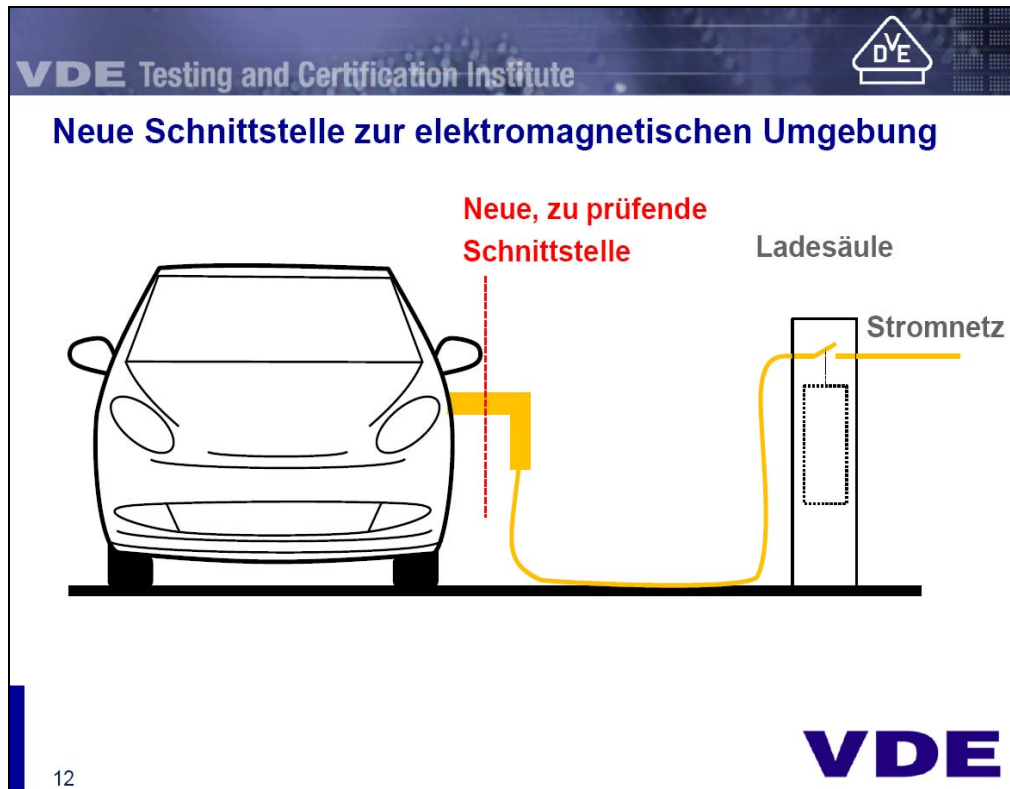


Abbildung 17: Die Anforderungen an Ladeeinrichtungen für Batterien in Fahrzeugen werden in der ECE R-10 Rev. 4 mit definiert

Neue Störsenken entstehen zum Beispiel durch neue Einkopplungspfade durch die galvanisch verbundene Ladeleitung oder Kommunikationsleitung. Außerdem haben die Hochvolt-Komponenten ebenfalls elektronische Steuerungen, die von der vorhandenen 12 Volt-Bordelektronik gestört werden können.

ECE-R 10 Revision 4

Die technischen Vorschriften für die EMV von Kraftfahrzeugen und Komponenten sind in der Regelung ECE-R 10 festgehalten. In der neuesten Revision 4 werden diese Anforderungen an die EMV ausgeweitet. Es sind jetzt auch die Anforderungen an Ladeeinrichtungen für Batterien in Fahrzeugen mit definiert (Coupling system for charging the RESS, 2.14). Unter RESS (Rechargeable Energy Storage System) wird dabei das wiederaufladbare Energiespeichersystem verstanden, welches elektrische Energie für den elektrischen Antrieb des Fahrzeugs liefert.

Die Vorschrift gilt für alle Kraftfahrzeuge zur Personenförderung mit mindestens 4 Rädern (M) und zur Güterbeförderung mit mindestens 4



Rädern (N). Sie ist auch gültig für alle Kraftfahrzeuge mit weniger als 4 Rädern (L), wie zum Beispiel E-Bikes, sowie Anhänger einschließlich Sattelanhänger (O). Die ECE-R 10 gilt allerdings nicht für so genannte Pedelec (Elektrische Fahrräder). Diese unterliegen der CE-Kennzeichnung.

Innerhalb dieser Fahrzeugklassen stellt die die Vorschrift die Mindestanforderungen hinsichtlich der EMV an Bauteile für den Einbau in Fahrzeuge, das Gesamtfahrzeug und nachträglich eingebautes Zubehör dar. Zu beachten ist, dass die Fahrzeughersteller oft eigene EMV-Normen zu Grunde legen, die deutlich mehr Prüfungen und schärfere Grenzwerte als die ECE-R 10 fordern.

Die Schutzziele der ECE Regelung umfassen zum einen die Störfestigkeit gegen gestrahlte und geleitete Störgrößen. Dazu zählt die Kontrolle des Fahrzeugs, der Schutz der Fahrgäste und anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Vermeidung von Störungen, die zur der Verwirrung des Fahrers und anderer Verkehrsteilnehmer führen könnten. Zum anderen zielt das Regelwerk auf die Vermeidung ungewollter geleiteter und gestrahlter Emissionen zum Schutz des Funkspektrums und anderer Elektronikkomponenten. Dieser Schutz bezieht sich dabei auf das eigene Fahrzeug, benachbarte Fahrzeuge und Anlagen in der Nähe des Fahrzeugs.

Neue Prüfanforderungen

Um den Anforderungen der Elektromobilität gerecht zu werden sind in der ECE-R 10 Rev. 4 die Störfestigkeitskriterien (2.12 f. und i.) um einen neuen Betriebszustand erweitert worden: den „Ladebetrieb“. Das Fahrzeug wird dabei geprüft, während es mit einem stationären Ladegerät (oder einer Spannungsquelle, Ladesäule) verbunden ist. Dies ist im Kapitel 7 der Norm geregelt. Wenn die Batterie zum Aufladen mit der Ladesäule verbunden ist, sind folgende Dinge zu prüfen: gestrahlte Störaussendungen, Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder, leitungsgeführte Störaussendungen und Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen (**Abbildung 18**).

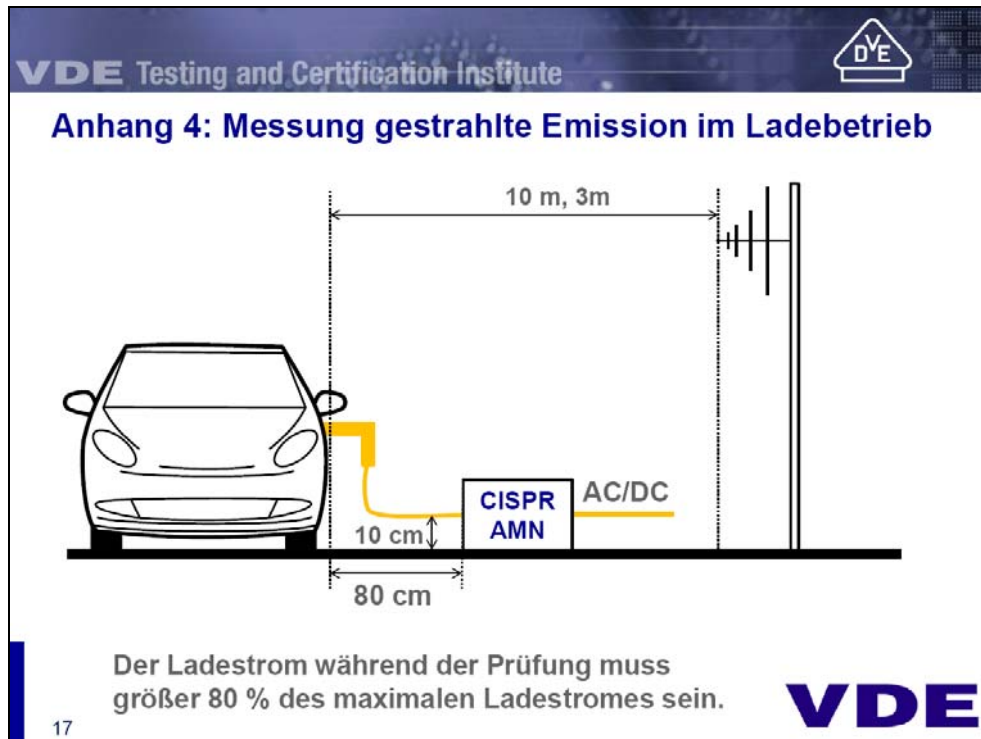


Abbildung 18: Prüfaufbau für gestrahlte Emissionen im Ladebetrieb

Zu den abzuprüfenden Parametern gehören dabei unter anderem Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker, Oberschwingungen, schnelle transiente elektrische Störgrößen (Burst) und Störfestigkeit gegen Stoßspannungen.

Um diese Tests durchzuführen wurden eine Reihe für die Kfz-Welt neuer Prüfnormen in der ECE Regelung eingeführt, so zum Beispiel:

- IEC 61000-3-2 "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2 - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)"
- IEC 61000-3-3 "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-3 - Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low voltage systems for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subjected to conditional connection"
- IEC 61000-3-11 "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-11 - Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low voltage systems □ Equipment with rated current ≤ 75 A per phase and subjected to conditional connection"



Zu den bestehenden Kriterien für das Nichtbestehen bei den Prüfungen zur Störfestigkeit ist außerdem ein weiteres hinzugekommen. Im Zustand „Ladebetrieb“ darf sich das Fahrzeug nicht ungewollt in Bewegung setzen.

Fazit

Mit der ECE-R 10 Revision 4 wird den neuen, durch die Elektromobilität entstehenden EMV-Herausforderungen Rechnung getragen. Für die Erlangung einer Typgenehmigung durch das Kraftfahrtbundesamt können Fahrzeuge mit aus dem Energieversorgungsnetz aufladbaren Antriebsbatterien können nach diesem Regelwerk geprüft werden. Bisher wurden die besonderen EMV-Verhältnisse in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen im Regelwerk nicht ausreichend berücksichtigt.

Zu beachten ist, dass die ECE-R 10 Revision 4 nur die Intersystem-EMV betrachtet, also die EMV zwischen Systemen im Fahrzeug und externen Systemen. Mögliche Einflüsse des Hochvolt-Bordnetzes auf die klassische 12 V-Elektronik im Fahrzeug werden dagegen nicht behandelt (Intrasystem-EMV). Hier sind aber ebenfalls neue, bisher nicht bekannte Wechselwirkungen denkbar.

Es ist bereits die ECE-R 10 Revision 5 in Arbeit. Hier soll auch die Prüfung von Hochvolt-Komponenten (Unterbaugruppen) eingearbeitet werden. Hochvoltkomponenten sollen getrennt typgeprüft werden können, um sie dann ohne weitere Prüfungen in verschiedene Fahrzeugtypen einbauen zu können. Damit wird dann auch das Thema Intrasystem-EMV in die ECE-R 10 Einzug halten.

Aspekte der Hochvolt-Bordnetz-Topologie

Dr. Martin März

Fraunhofer IISB

Abstract

Die bisher vorherrschende Topologie der zentralen Leistungselektronik benötigt sehr viele Kabel und Stecker. Sie verursacht damit hohes Gewicht und hohe Kosten und ist auch aus EMV-Sicht nicht unproblematisch. Der Ansatz der wirkortnahen Systemintegration vermeidet diese Nachteile, indem die Leistungselektronik dort verbaut wird, wo sie ihrer Funktion nach



gebraucht wird. Das Konzept basiert auf zwei zentralen Komponenten: intelligenten Antrieben und intelligenten Batteriesystemen. Weiterhin wird das Konzept eines Hochvolt DC/DC-Wandlers vorgestellt, der zusätzliche Funktionalitäten bis hin zu einer integrierten Schnellladefunktion bietet.

Einführung

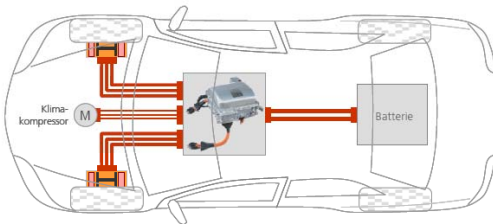
Die Architektur des Hochvolt-Bordnetzes ist ein entscheidender Bestandteil eines erfolgreichen Elektrofahrzeugs. Innerhalb dieses Bordnetzes gibt es verschiedene Umrichtersysteme. So beispielsweise Umrichter für Fahrantriebe, die in jeder Architektur gebraucht werden. Zu den optionalen Spannungswandlern zählen solche für die Versorgung des Niederspannungsnetzes sowie das Ladegerät. Aus Art und Umfang dieser Komponenten leiten sich jeweils spezifische Strukturen des Hochvolt-Bordnetzes ab. Diese werden auch als Topologien bezeichnet.

Ein wichtiger Aspekt bei den Topologien ist die Frage der Partitionierung, also wie diese unterschiedlichen Systeme innerhalb des Fahrzeugs aufgeteilt und verbaut werden. Der Status Quo heute ist das Konzept der zentralen Leistungselektronik (Abbildung 19). Dieser konservative Ansatz reduziert die technologischen Anforderungen an die Leistungselektronik sehr stark. Er führt damit aber auch zu einer sehr hohen Komplexität des Hochvolt-Kabelbaums. Es ist eine Vielzahl geschirmter Kabel und Stecker notwendig. Das bringt nicht nur Gewichtsprobleme mit sich, sondern auch Kostenprobleme. Zudem sind sehr viele AC-belastete Kabel verbaut, die unter dem EMV-Gesichtspunkten erhebliche Probleme darstellen. Auch im Hinblick auf Unfallsicherheit hat diese Topologie Nachteile. Denn bei einem so verzweigten Hochvolt-Bordnetz gibt es viele kritische Stellen, die für die Arbeit der Rettungsdienste im Falle eines Unfalls problematisch werden können.

Elektrifizierung des Antriebsstrangs

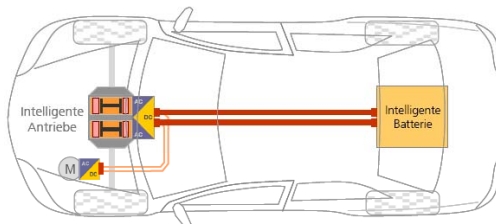
Kostensenkung durch Systemintegration

Zentrale Leistungselektronik



- **Hohe Kosten** durch eine Vielzahl geschirmter Hochvolt-Kabel und Hochstromkontakte
- **Hohes Zusatzgewicht, hoher Platzbedarf**
- Hoher Aufwand für Sicherheit, Zuverlässigkeit und EMV

Wirkortnahe Systemintegration¹⁾



- Minimale Komplexität des HV-Kabelbaums
- **Keine AC-belasteten Kabel**, EMV-günstiges reines DC-Netz
- Erhebliche Reduzierung von Kosten und Zusatzgewicht!

1) d.h. Platzierung der Leistungselektronik dorthin wo sie ihrer Funktion gemäß hingehört!

Dr. Martin März
© Fraunhofer IISB

Fraunhofer
IISB

Abbildung 19: Zentrale vs. wirkortnahe Topologie

Ein anderer Ansatz ist der der wirkortnahen Systemintegration (Abbildung 19). Er führt zu einer deutlich verringerten Komplexität des Hochvoltkabelbaums. Der Ansatz der wirkortnahen Systemintegration umfasst zwei Kernkomponenten: intelligente Batteriesysteme und intelligente Antriebe. Wirkortnah bedeutet hier die Platzierung der Leistungselektronik dorthin, wo sie ihrer Funktion gemäß hingehört. So wird beispielsweise der Umrichter, der den Motor antreibt, am Motor platziert. Im intelligenten Batteriesystem dagegen wird alles untergebracht, was mit elektrischem Energiemanagement und Spannungsversorgung zu tun hat. Dieser Ansatz minimiert Kosten und Bauraumbedarf der gesamten Hochvolt-Bordnetzstruktur. Auf die gesamte Dreifachverkabelung zwischen Elektronik und elektrischer Maschine kann verzichtet werden. Im Bereich der intelligenten Antriebe wird dieses Konzept schon ganz klar verfolgt. Es gibt bereits Serienfahrzeuge, die mit wirkortnah angebaute Leistungselektronik arbeiten. Derzeit gibt es auf breiter Front fortlaufende Entwicklungsaktivitäten.

Intelligente Batteriesysteme

Hier ist die Entwicklung noch nicht ganz so weit fortgeschritten wie bei den intelligenten Antrieben. Erste Systemprototypen werden derzeit entwickelt



und gebaut. Auch hier lautet die Grundidee, dass alle relevanten Komponenten räumlich sehr nah zusammengefasst werden (Abbildung 20). Dies betrifft die Komponenten zum elektrischen Energiemanagement, zur Ladetechnik oder zur Spannungsversorgung. All dies wird zusammen mit dem eigentlichen Zellstack in eine intelligente Batterieeinheit gepackt. Am Ende entsteht so viel mehr als nur eine Batterie, nämlich eine hochfunktionale Energieversorgungs- und Energiemanagementeinheit.

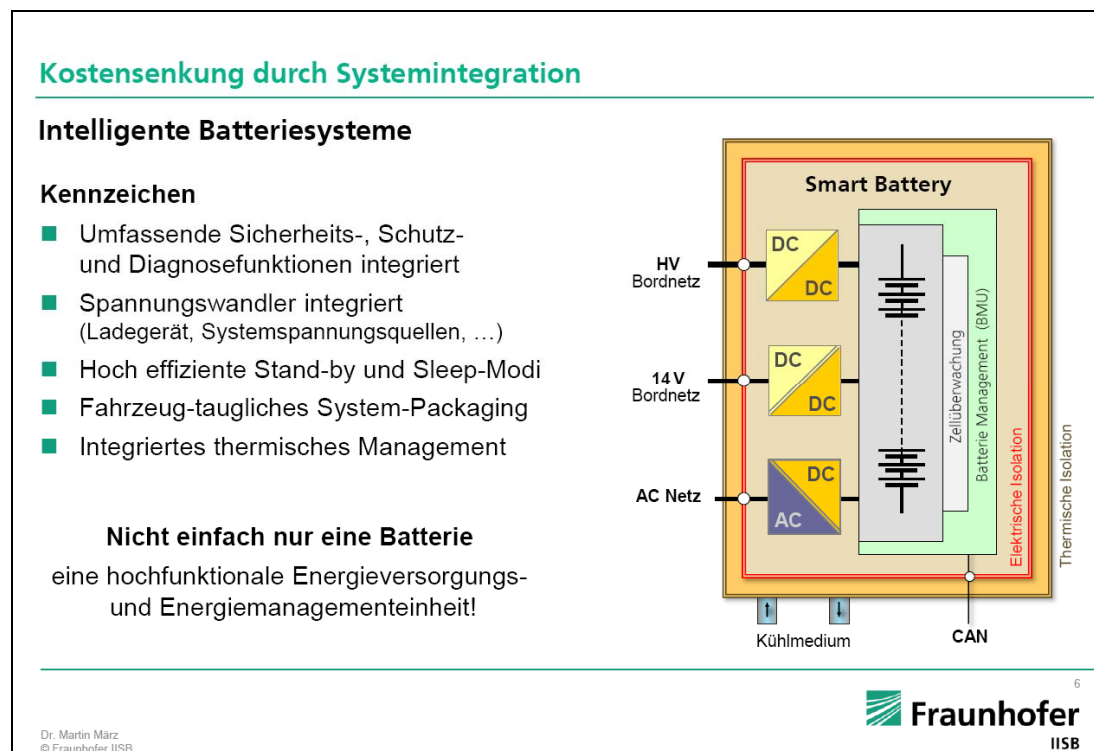


Abbildung 20: Intelligente Batteriesysteme

Ein solches intelligentes Batteriesystem ermöglicht deutlich mehr Funktionalität als ein heutiges verteiltes System. Nur ein Beispiel: nahezu alle heute verfügbaren Elektroserienfahrzeuge sind nicht mehr startfähig, wenn die 12 V-Batterie leer ist, selbst wenn die Hochleistungsbatterie für den Elektroantrieb voll ist. Das ist dem Endnutzer nicht vermittelbar. Ein intelligentes Batteriesystem schafft hier Abhilfe und ermöglicht das Starten, so lange auch nur ein wenig Leistung in der Antriebsbatterie übrig ist.

Zwei Prototypen

Das Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik am Fraunhofer IISB hat zwei Prototypen für solche Systeme gebaut. Im Bereich der Hybridantriebe wurde die Machbarkeit des Konzepts bei einem Audi TT

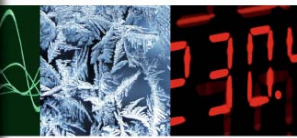
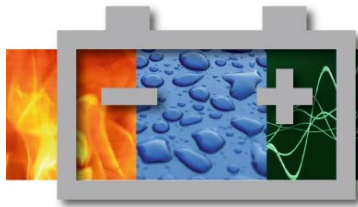


gezeigt. Das Batteriesystem beinhaltet hier neben dem eigentlichen Zellstack alle im Fahrzeug benötigten Wandler. Außerdem ist ein multifunktionales Netzinterface vorhanden, welches ein rückspeise- und inselnetzfähiges Ladegerät beinhaltet. Der modulare Zellstack ist mit Funktionen zur Zellüberwachung und zum aktiven Balancing ausgestattet. Der zweite Prototyp ist ein reines Elektroauto. Zusammen mit der Universität Erlangen wurde das so genannte „EcoCar“ gebaut.

Smart Battery mit Traktionsspannungswandler im Multiport-Design

Eine weitere interessante Komponente des Systems ist ein Hochvolt DC/DC-Wandler. Dies ist bei den Fahrzeugherstellern ein kontrovers diskutiertes Bauteil, weil es auf den ersten Blick Kosten verursacht. Es bietet auf der anderen Seite aber auch einige erhebliche Vorteile. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Der erste Vorteil ist die Flexibilität. Solche Wandler, realisiert im Multiport-Design, sind frei gruppierbar. Ein konkretes Beispiel besteht aus sechs parallelen Wandlerkanälen mit einer Leistungsfähigkeit von jeweils 20 kW (Abbildung 21). Die Wandlergruppe ist volldigital geregelt. Jeder dieser Wandler ist völlig frei programmierbar. Damit ist dies eine extrem flexible Energiemanagementeinheit.



Leistungselektronik für die Elektromobilität

Smart Battery mit Traktionsspannungswandler im Multiport-Design

- Erlaubt den individuellen Betrieb von parallelen Batteriestrings (verteilten Batterien)
- Unterstützt alle Konzepte wie Range-Extender, Hybrid-Batterien¹⁾ oder Wechselbatterien
- Kostenlose DC-Schnellladefunktionalität

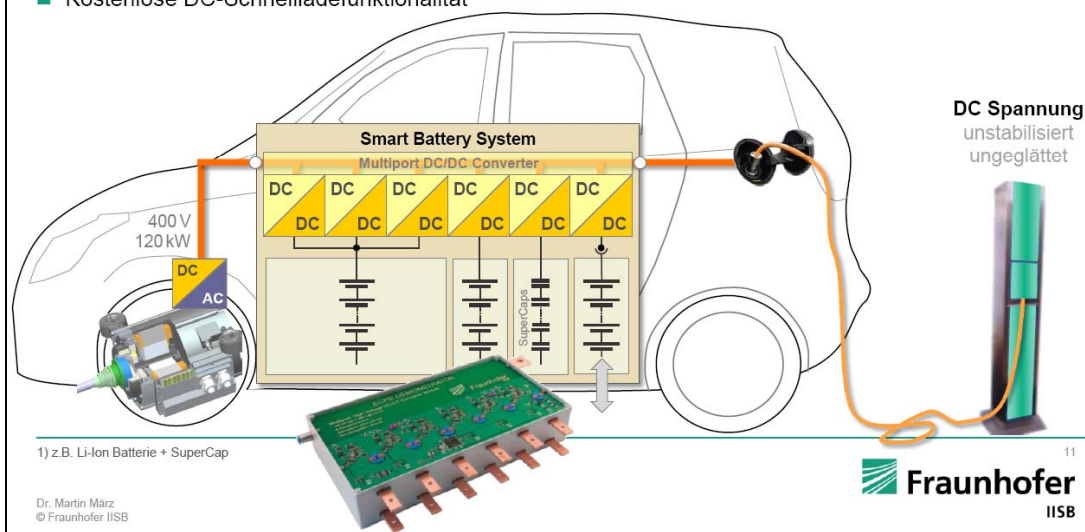


Abbildung 21: Smart Battery mit Traktionsspannungswandler im Multiport-Design

Der zweite Vorteil besteht im geringen benötigten Bauvolumen. Ein solcher Wandler lässt sich heute bereits bei einer Leistung von 120 kW mit nur drei Litern Bauvolumen realisieren. Dies allerdings nur bei Anwendungen, wo Kosten keine Rolle spielen, wie z.B. im Rennsportbereich. Für die Serienfertigung ist mit Bauvolumen von immer noch guten 12-15 Litern zu rechnen.

Der Wirkungsgrad solcher Energiemanagementsysteme liegt heute nahe 99 Prozent. Diese extremen Wirkungsgrade ermöglichen es, solche Wandler auch in luftgekühlte Batteriesysteme zu integrieren. Untersuchungen haben gezeigt, dass das gesamththermische Management der Speichereinheit durch solche Wandler nicht beeinträchtigt wird.

Ein solches Wandlersystem lässt sich flexible bei allen derzeit verfügbaren Energiequellenkonzepten einsetzen. Es funktioniert sowohl mit Range Extendern, Hybrid-Batterien oder Wechselbatterien. Es erlaubt außerdem den individuellen Betrieb von parallelen Batteriestrings (verteilten Batterien).



Kostenlose DC-Schnellladefunktionalität

Darüber hinaus ermöglicht ein solcher Wandler die Integration von Schnellladefunktionalität. Bei diesem Thema gibt es derzeit häufig Diskussionen, wo ein solches Schnellladegerät eigentlich verbaut sein soll. Die Automobilhersteller wollen es aus Kosten- und Gewichtsgründen auf keinen Fall im Fahrzeug haben, die Ladeinfrastrukturbetreiber wollen es auf keinen Fall als Teil der Infrastruktur finanzieren. Dies ist leicht nachzuvollziehen, wenn man beispielsweise an ein Parkhaus mit 100 oder 200 Stellplätzen denkt. Hier kann nicht jeder Ladeknoten mit einem Schnellladegerät ausgerüstet werden, das wäre völlig unfinanzierbar und auch über den Preis für den Ladevorgang nicht refinanzierbar.

Eine Lösung ist, völlig ohne ein explizites Schnellladegerät auszukommen. Der beschriebene DC/DC-Wandler kann einfach an die gleichgerichtete Netzspannung, z.B. als Energiebus innerhalb eines Parkhauses, angeschlossen werden. Die unregelmäßige Gleichspannung wird im Fahrzeug aufgenommen und über den DC/DC-Wandler auf die Ladeanforderungen der Batterie geregelt.

Fazit

Es wurde gezeigt, dass das Konzept der wirkortnahen Systemintegration viele Vorteile gegenüber dem bisher geläufigen Konzept der zentralen Leistungselektronik bietet. Mit diesem Ansatz lassen sich die wesentlichen Hochvoltbaugruppen mit deutlich weniger Platz und Gewicht realisieren. Die so verringerte Systemkomplexität wiederum reduziert auch die Systemkosten. Die Systemintegration steht in keinem unauflösbaren Widerspruch zu Forderungen nach Modularität, Skalierbarkeit und Servicefreundlichkeit.

Ein weiterer Bestandteil des Konzepts sind intelligente Batteriesysteme. Sie bieten eine deutlich erhöhte Funktionalität, eine deutliche Vereinfachung der Fahrzeugintegration und damit eine reduzierte Fehleranfälligkeit gegenüber einfachen Batterien, die nur Strom speichern. Der vorgestellte Ansatz der wirkortnahen Integration der Hochvoltkomponenten wurde bereits erfolgreich in zwei Prototypen getestet und hat damit seine Praxistauglichkeit unter Beweis gestellt.



Session 3: Ladevorgang

Niederspannungsrichtlinie – Markstein für Normung und Prüfung

Haimo Huhle

ZVEI

Abstract

Der Beitrag stellt zunächst die zwei Hauptfunktionen der europäischen Niederspannungsrichtlinie vor: die Sicherheit elektrischer Produkte und ihren freien Warenverkehr innerhalb der EU zu gewährleisten.

Anschließend geht er der Frage nach, ob die Betriebsmittel des Ladevorgangs (Stecker, Kabel, Ladesäule) der europäischen Niederspannungsrichtlinie unterliegen. Dies wird bejaht. Die Konsequenz daraus ist, dass Komponenten wie Ladestecker nicht im freien Warenverkehr in der EU behindert werden dürfen, wenn sie den gängigen Sicherheitsnormen entsprechen.

Einführung

Die Niederspannungsrichtlinie ist das wichtigste Regelungsinstrument für die Sicherheit elektrisch betriebener Geräte in Europa. Ihr offizieller Titel: Richtlinie 2006/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen. Diese Spannungsgrenzen liegen zwischen 50 und 1000 V für Wechselstrom und zwischen 75 und 1500 V für Gleichstrom.

Die Niederspannungsrichtlinie beruht auf dem Prinzip des Angleichs der Rechtsvorschriften. Sie hat zwei Ziele. Zum einen soll sie gewährleisten, dass elektrische Betriebsmittel nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn sie bei einer ordnungsgemäßen Installation und Wartung die Sicherheit nicht gefährden. Zum anderen soll sie den freien Verkehr der elektrischen Betriebsmittel innerhalb der Europäischen Union fördern.

Um das Sicherheitsziel zu erreichen, fordert die Richtlinie von den Mitgliedstaaten, alle zweckdienlichen Maßnahmen für sichere Produkte zu treffen. Der Maßstab für sichere Produkte ist dabei der „in der



Gemeinschaft gegebenen Stand der Sicherheitstechnik". Das nähere ist in elf Schutzzielen im Anhang der Richtlinie geregelt (Abbildung 22). Beispielsweise müssen Menschen und Nutztiere angemessen vor Gefahren geschützt werden, die durch Berührung spannungsführender Teile entstehen. Der Umfang der Schutzziele macht deutlich, dass die Niederspannungsrichtlinie nicht nur elektrische Sicherheit zum Ziel hat, sondern alle Gefährdungen abdeckt, die von elektrischen Betriebsmitteln ausgehen können. Sie verfolgt also einen Total Safety Approach. Verantwortlich für die Einhaltung all dieser Sicherheitsanforderungen ist der Hersteller der elektrischen und elektronischen Geräte.

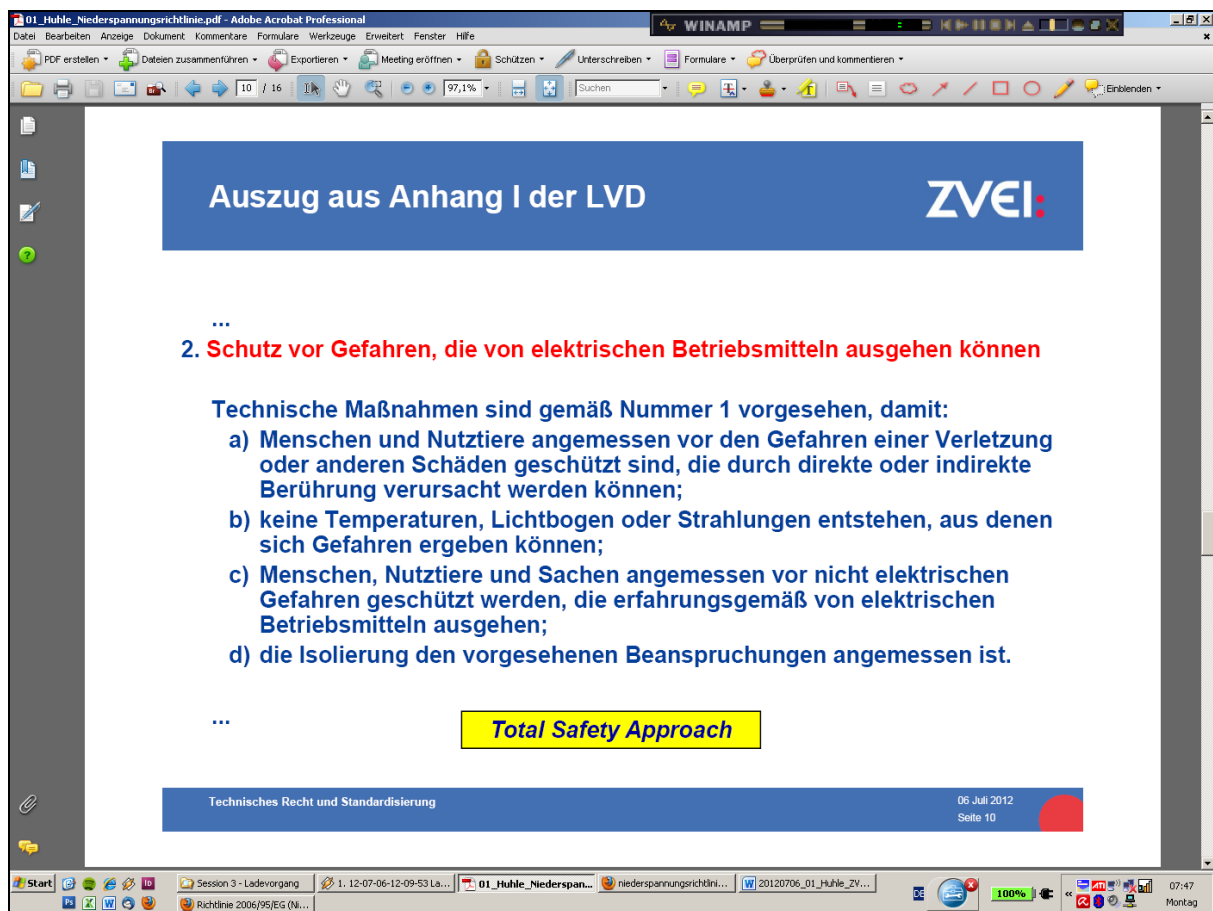


Abbildung 22: Auszug aus den elf Schutzzielen der Niederspannungsrichtlinie

Die konkrete Umsetzung der elf Schutzziele wiederum ist in technischen Normen geregelt. Europäische Normen (wie z.B. die EN 60335-1 für Hausgeräte und viele weitere Normen) definieren konkrete Sicherheitsanforderungen. Diese normierten Sicherheitsanforderungen beziehen sich auf so unterschiedliche Bereiche wie den Schutz gegen



Zugang zu aktiven Teilen, die Feuchtigkeitsbeständigkeit oder den unsachgemäßen Betrieb. Die Normen sind so präzise verfasst, dass die Hersteller ihre Produkte danach konstruieren und prüfen können. So werden die allgemeinen Sicherheitsanforderungen der Niederspannungsrichtlinie konkretisiert.

Elektrische Betriebsmittel, die die Niederspannungsrichtlinie erfüllen, werden mit der CE-Kennzeichnung versehen. Hierbei gilt die sogenannte Konformitätsvermutung, d.h. die einzelnen Mitgliedstaaten gehen davon aus, dass ein mit der CE-Kennzeichnung versehenes elektrisches Betriebsmittel die Schutzziele der Niederspannungsrichtlinie und ggf. weiterer zutreffender Richtlinien erfüllt. Auf diese Weise sollen Handelshemmnisse zwischen den einzelnen Mitgliedstaaten vermieden werden.

Gültigkeit der Niederspannungsrichtlinie in der Elektromobilität

Welche Bestandteile der Elektromobilität fallen unter die Niederspannungsrichtlinie? In der Branche herrscht Einigkeit darüber, dass das Elektroauto selbst kein Betriebsmittel innerhalb der Niederspannungsrichtlinie ist. Das gilt auch für die Bauteile, die im Auto spezifisch für den Elektroantrieb verbaut wurden. Bei den Betriebsmitteln, die den Ladevorgang ermöglichen, sieht es anders aus. Diese fallen – zumindest auf der Infrastrukturseite – unter die Niederspannungsrichtlinie. Dazu gehören der Ladestecker, das Ladekabel und die Ladesäule. Diese Schlussfolgerung hat praktische Implikationen in der Debatte um die Steckertypen für Europa. Da der Ladestecker ein elektrisches Betriebsmittel ist, fällt er unter die Niederspannungsrichtlinie. Dies wiederum bedeutet, dass sein freier Warenverkehr in der EU nicht behindert werden darf, wenn er den dazugehörigen Sicherheitsnormen entspricht. Dies trifft auf den Typ 2 Stecker ohne Zweifel zu. Daher greift z.B. die Argumentation Frankreichs nicht, den Stecker wegen nicht vorhandener Sicherheitsfunktionen nicht zuzulassen.



Induktive Energieübertragung – Grundlagen und Anwendungen

Prof. Dr. Jürgen Meins

TU Braunschweig

Abstract

Eine Alternative zum herkömmlichen drahtgebundenen Ladevorgang ist das induktive Laden. In einer Reihe von Referenzprojekten wurde die Machbarkeit des Konzepts für die Verkehrstechnik bereits bewiesen. Dazu gehören der Transrapid, das Straßenbahnprojekt „Primove“ in Augsburg und das berührungslose Laden einer elektrifizierten Buslinie in Braunschweig. Ein wesentlicher Vorteil des Systems ist die in den Boden eingelassene unsichtbare Infrastruktur. Beschädigungen durch Vandalismus oder Diebstahl können damit ausgeschlossen werden – beides wichtige Aspekte bei öffentlichen Ladestationen. Die Ladung funktioniert bei jedem Wetter und praktisch wartungsfrei. All diese Vorteile zusammen machen das induktive Laden zu einer relevanten Alternative beim Ladevorgang von Elektroautos.

Grundlagen

Bei der induktiven Energieübertragung wird Energie drahtlos von einem Objekt auf ein anderes übertragen. Die Übertragungssysteme nutzen dabei das Prinzip des Transformators. Es gibt jedoch keinen geschlossenen Eisenkern wie beim Transformator, sondern einen offenen Kern, wo der Primärleiter als lange Leiterschleife ausgeführt wird, in welcher der Kern mit dem Sekundärleiter linear bewegt werden kann.

Die Vorteile des Prinzips sind in erster Linie eine höhere Mobilität und leichtere Handhabbarkeit durch den Wegfall der Ladekabel. Das System hat außerdem nur einen niedrigen Instandhaltungsaufwands und geringe Störanfälligkeit. So ist beispielsweise Vandalismus bei einem unter der Erde verbauten induktiven Ladesystem im Gegensatz zu Ladestationen im öffentlichen Raum nicht zu befürchten. Da alle Elemente unterirdisch verlegt sind, fügt sich die Lösung außerdem harmonisch ins Stadtbild ein.

Referenzprojekte in der Verkehrstechnik


Induktive Energieübertragung ist bereits in einer Vielzahl von Anwendungen kommerziell verfügbar. So zum Beispiel bei autonomen




Transportfahrzeuge und Werkzeugstationen in der Industrie. Im Bereich Mobilität findet die Technologie bereits Anwendung bei Straßenbahnen, dem Transrapid, Elektro-Autos und Elektrobussen. Auf der Versuchsanlage des Transrapid im Emsland wurde beispielsweise die berührungslose Stromversorgung der Triebwagen erstmalig auch bei hohen übertragenen Leistungen von bis zu 200 kW demonstriert.


Das Straßenbahnprojekt „Primove“ von Bombardier in Augsburg erzielte ebenfalls hohe übertragene Leistungen von bis zu 250 kW. Dort wurde im September 2010 in Zusammenarbeit mit der Stadtwerke Augsburg Verkehrs-GmbH und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ein kontakt- und oberleitungsfreies Energieversorgungssystem für Straßenbahnen auf einem bestehenden Streckenabschnitt der Linie 3 zum Messegelände installiert. Eine bidirektionale Niederflurstraßenbahn wurde mit zwei Stromempfängern (Aufnahmespulen) ausgerüstet. Diese nehmen den Strom auf, der induktiv von den unterirdisch zwischen den Gleisen verlegten Kabelsegmenten übertragen wird. Wechselrichter entlang der Trasse sind mit einem 750 V-Gleichstromversorgungsnetz verbunden. Bei diesem Pilotversuch wurde der reguläre Betrieb in einem städtischen Umfeld demonstriert. Durch die Tests wurden die außerordentliche Zuverlässigkeit des Systems unter allen Umgebungsbedingungen sowie die vollständige Einhaltung aller geltenden Vorschriften und Normen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit nachgewiesen. Die begleitenden EMV-Untersuchungen zeigten, dass das Magnetfeld zwar unter der Straßenbahn eine relativ hohe Amplitude hat (Werte zwischen 5 und 10 mT). Schon wenige Zentimeter entfernt nimmt das Feld jedoch sehr stark ab. So ist im Ein- und Ausgangsbereich der Tram keine nennenswerte Belastung mehr festzustellen (ca. 5-6 μT).





IMAB Institut für Elektrische Maschinen,
Antriebe und Bahnen
TU Braunschweig





**Induktive Energieübertragung für Busse im
Öffentlichen Personen Nahverkehr (ÖPNV)**

Zentraler Busbahnhof Braunschweig

Zukunft Elektromobilität (Elektrobus in Braunschweig)

35

Abbildung 23: Pilotprojekt in Braunschweig: Seit Sommer 2012 wird eine städtische Buslinie induktiv geladen

Ein weiteres Pilotprojekt zum induktiven Laden im Öffentlichen Nahverkehr ist eine Buslinie in Braunschweig (Abbildung 23). Seit Juni 2012 ist ein Abschnitt des örtlichen Busnetzes auf umweltfreundlichen Elektrobetrieb umgestellt. Zum Pilotprojekt wurden zwei Linien auf dem 12 km langen City-Ring auf induktive Ladung umgestellt. Über in die Fahrbahn- oder Haltestellenflächen eingebaute Aufladestationen und einem unter dem Fahrzeug montierten Aufnahmepad können die Elektrobusse während der Standzeiten oder auch während der Linienfahrt geladen werden.

Auch hier ist Bombardier der Industriepartner, weitere Projektpartner sind die Braunschweiger Verkehrs-AG, die TU Braunschweig und der Energieversorger BS | Energy. Das Projekt wird ebenfalls vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gefördert.

Der Vorteil bei allen genannten Demonstratoren liegt auf der Hand: es müssen keine Oberleitungen mehr verlegt werden, die Stromversorgung erfolgt unsichtbar aus Schiene oder Straße. Ein weiterer Pluspunkt der Technologie sind die hohen Wirkungsgrade. Bei einer punktförmigen Anwendung, wie sie bei einem Ladeplatz für Elektrofahrzeuge der Fall ist, werden Wirkungsgrade von 90 bis 95 Prozent erreicht.



Nationale Plattform Elektromobilität

Neue Impulse hat das induktive Laden durch die Nationale Plattform Elektromobilität bekommen. Hier wurde von Anfang an der Weg zum Elektroauto als Chance für die Verbreitung des Konzepts „induktives Laden“ gesehen. Zu Beginn stand noch die Idee des Ladens während der Fahrt im Vordergrund. Letztlich stellte dieser Ansatz aber zu hohe Anforderungen an die nötige Infrastruktur und wurde daher auch aus politischen Gründen nicht mehr weiter verfolgt. Stattdessen konzentrierten sich die Bemühungen schnell auf punktförmiges, stationäres Laden als Alternative oder Ergänzung zu den bekannten Ladestationen.

In der Arbeitsgruppe 3 der Nationalen Plattform Elektromobilität ist das induktive Laden fest verankert. Der Schwerpunkt liegt derzeit auf Ladeleistung, die mit Einphasen-Wechselstrom 16 A abgesichert kompatibel ist. Es wird aber auch schon an Schnellladeleistung gedacht bis hin zu 60 kW. Ein Parallelbetrieb von kabelgebundenem und induktivem Laden in den Städten und Gemeinden ist denkbar.



Abbildung 24: Baumuster induktiver Ladetechnik verschiedener Hersteller

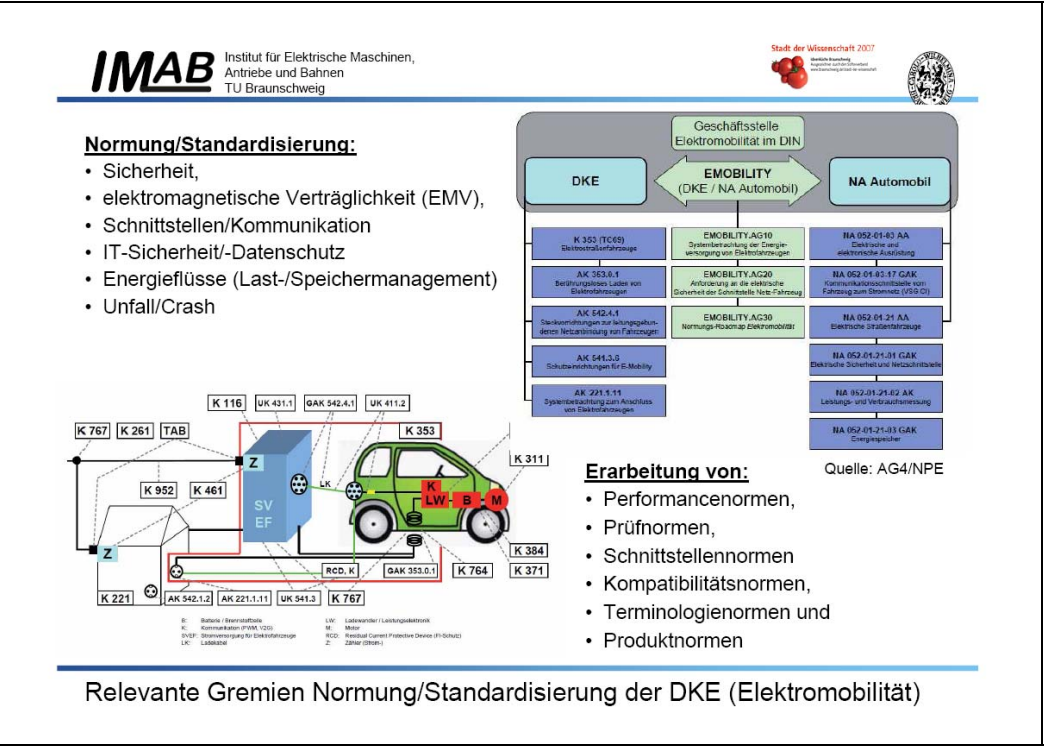
Marktreife Lösungen werden bereits von mehreren Herstellern weltweit angeboten (**Abbildung 24**). Die Bodenplatten haben dabei Kantenlängen



von ca. 60 bis 80 cm. Einen interessanten Ansatz verfolgt das Unternehmen Vahle. Hier erfolgt die Ladung über das Nummernschild des Autos und nicht über Aufnehmer am Boden des Fahrzeugs. Auf der stationären Seite ist dabei in Höhe des Nummernschildes eine Spule aufgestellt, die Sekundärseite, das Pick-Up, ist hinter dem Nummernschild des Fahrzeugs angeordnet. Mit einer Zusatzausrüstung kann sogar eine kontinuierliche Datenübertragung zwischen Ladestation und Fahrzeug realisiert werden – wichtig zum Beispiel für das Abrechnen des Tankvorgangs. Es kann so ohne Kabel, Stecker oder mechanischen Kontakt quasi „nebenbei“ aufgeladen werden, also ohne Eingriff des Fahrers.

Normung durch die VDE | DKE

Eine wichtige Rolle hin zur weiteren Verbreitung des induktiven Ladens bei Elektroautos spielt die Standardisierung (**Abbildung 25**). In der VDE | DKE gibt es hierzu den Arbeitskreis AK 353.0.1, der Ende 2010 den Entwurf einer Anwendungsregel zum induktiven Laden von Elektrofahrzeugen erstellt hat. Die Normungsarbeiten haben zwei Ziele. Zum einen das Erhöhen der Sicherheit, zum anderen die Kompatibilität der Anlagen verschiedener Hersteller untereinander.



Fazit

Die Machbarkeit der induktiven Ladung für Elektrofahrzeuge auf Schiene und Straße wurde bereits mehrfach unter Beweis gestellt (Buslinie Braunschweig, „Primove“-Tram, Transrapid). Es gibt letztlich keine Gründe, die gegen die Masseninstallation induktiver Ladepunkte in Städten und Gemeinden sprechen. Das kabelbasierte Laden ist derzeit möglicherweise von der Infrastrukturplanung schon weiter. Wie beschrieben sind Nachteile bei dieser konventionellen Ladeart aber Nachteile im Bereich Störungssicherheit (Vandalismus) und Handling gegeben (Fahrer muss aktiv laden, Ladekabel muss mitgeführt werden).

Induktive Ladung lässt sich prinzipiell auch bidirektional nutzen. Als Ausblick sind so Konzepte denkbar, in denen das Auto auch als Energiespeicher dient. Nichtverbraucher Strom könnte dann auch wieder ins Netz zurückgespeist werden. Technisch ist ein solches Szenario leicht umzusetzen.



Smart Charging – intelligente „Vehicle to Grid“-Kommunikation

Dr. Tim Schlüsener

Daimler AG

Abstract

Das Management des Ladevorgangs ist nötig, da beispielsweise das Stromnetz bei zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen an seine Belastungsgrenzen stoßen würde. Unter dem Begriff „Smart Charging“ wird eine Reihe von Techniken subsummiert, die das Laden flexibler und intelligenter macht. Kern des Ansatzes ist dabei eine bidirektionale Kommunikation zwischen Auto und Ladestation. Nur im Zusammenspiel von Auto und Ladeinfrastruktur kann die jeweils optimale Ladekurve ermittelt werden. Mit der Norm ISO/IEC 15118 wird derzeit ein einheitlicher Kommunikationsstandard für intelligentes Laden erarbeitet.

Einführung

Ungesteuertes Laden kann den Nutzer eines Elektrofahrzeugs und das Stromnetz schnell vor eine Reihe von Problemen stellen. Das sofortige Laden unter Volllast kann die Lebensdauer des Akkus schädigen, wenn er nach einer längeren Fahrt noch besonders heiß ist. Werden mehrere Elektrofahrzeuge zur gleichen Zeit im selben Ortsnetz geladen, kann dieses Netz schnell an seine Belastungsgrenze stoßen. Schließlich bietet das konventionelle Laden an einer öffentlichen Ladesäule heute meist keine Möglichkeit zum automatischen Abrechnen des Ladevorgangs. Aufgrund all dieser Nachteile arbeiten Automobilhersteller, Hersteller von Ladesäulen und Netzbetreiber seit einiger Zeit an Konzepten zu „Smart Charging“ bei dem die Ladestation mit dem Ladesteuergerät des Elektromobils kommuniziert.

Lastmanagement

Die Aufrechterhaltung der Netzstabilität ist einer der wichtigsten Gründe für intelligentes Laden. In Feldstudien zeigte sich, dass Kunden ihre Elektroautos oft am Ende ihres Arbeitstages in den Abendstunden laden. In diese Zeit fallen allerdings auch die Spitzenbelastungszeiten der Stromnetze. Eine drohende Überlastung einzelner Ortsnetze lässt sich durch gesteuertes Laden leicht vermeiden. Denn in den meisten Anwendungsszenarien ist es gar nicht nötig, das Auto sofort mit maximaler Leistung zu laden. Oft hat das Fahrzeug die ganze Nacht Zeit zum Laden,



der Ladevorgang kann dann über die ganze Nacht verteilt werden. Wenn zukünftig intelligente Netze mit dynamischen Strompreisen Realität werden, ist auch eine Verlagerung des Ladevorgangs in Zeiten mit besonders niedrigen Strompreisen (z.B. bei einer temporären Überproduktion durch Windkraft) denkbar.

Funktionsprinzip des intelligenten Ladens

Die Grundvoraussetzung für intelligentes Laden ist eine Kommunikationsverbindung zwischen Auto und Ladesäule. Wichtig ist dabei eine bidirektionale Kommunikation. Weder Netz noch Auto allein können den Ladevorgang steuern, erst durch ein „Aushandeln“ der jeweils optimalen Parameter kann die optimale Ladekurve ermittelt werden. Der folgende Überblick über einen gesteuerten Ladevorgang verdeutlicht die notwendige Kommunikation (**Abbildung 26**).

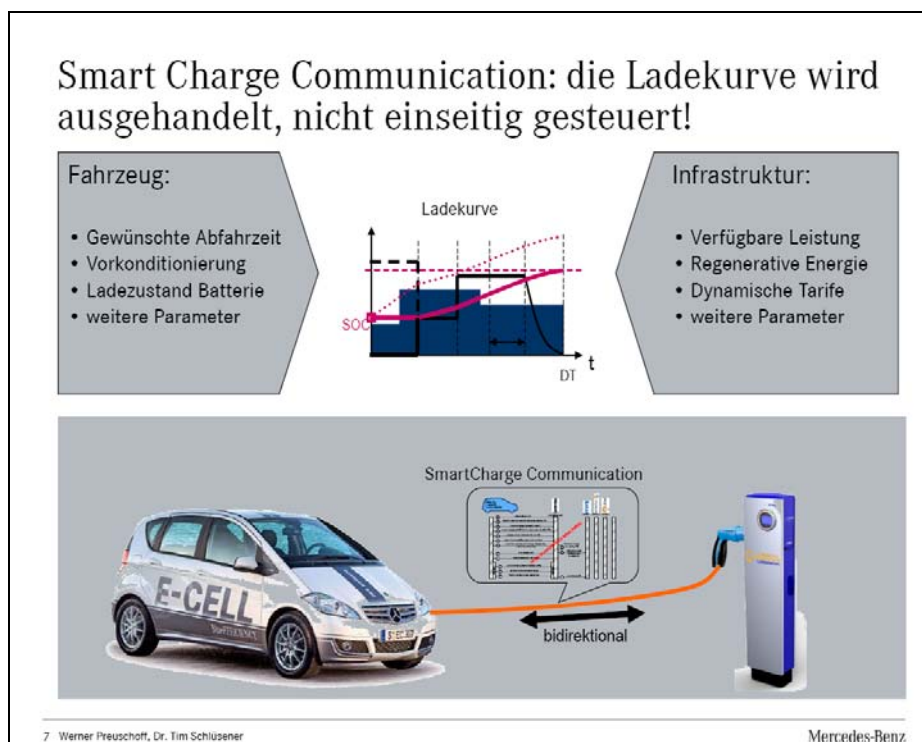


Abbildung 26: Nur bidirektionale Kommunikation führt zu einem optimalen Ladevorgang

Nach Einstecken des Ladekabels erfolgt als erstes ein Sicherheitscheck. Nur wenn das System geerdet ist und alle sonstigen Sicherheitssysteme aktiv sind, wird überhaupt mit dem Ladevorgang fortgefahren. Als nächstes werden Parametern wie Ladedauer und -leistung zwischen



Elektrofahrzeug und Ladesäule ausgehandelt. Bei einer öffentlichen Ladeleistung können jetzt auch die Abrechnungsmodalitäten geklärt werden. Moderne Systeme haben Zertifikate direkt im Fahrzeug hinterlegt. Der Kunde muss dann nicht mehr mit der Ladeinfrastruktur interagieren, die Abrechnung kann automatisch erfolgen. Es folgt der eigentliche Ladevorgang. Er folgt jetzt dem individuell für diesen einen Ladevorgang ermittelten Profil und kann außerdem während des Ladens dynamisch angepasst werden. Ist der Ladevorgang abgeschlossen, verständigen sich Ladesäule und Auto über die tatsächlich geflossene Energiemenge. Auf dieser Basis wird der Ladevorgang schließlich abgerechnet.

ISO/IEC 15118

Um „Smart Charging“ zu standardisieren wird in Europa derzeit an der Norm ISO/IEC 15118 gearbeitet (**Abbildung 27**). In dieser Normungsgruppe sind alle wichtigen Akteure wie OEMs, Energieversorger sowie Infrastruktur- und Bauteilehersteller vertreten. ISO 15118 besteht aus drei Teilen und definiert die Funktionen für die Kommunikation der verschiedenen Schichten gemäß dem OSI-Referenzmodell. In Teil 1 geht es um die Anwendung, Teil 2 befasst sich mit den Schichten 3 bis 7 und beschreibt die technischen Protokolle und in Teil 3 geht es um die physikalischen und Verbindungsanforderungen an die Bitübertragungs- und Sicherungsschicht. In ISO 15118, die von DIN und DKE übernommen wird, geht es genau um die gerade beschriebenen Aspekte, nämlich die aktive Ladesteuerung, die Stromaufnahme und die spontane Anpassung des Ladevorgangs, um eine Überlastung des Stromnetzes zu vermeiden. ISO 15118 setzt bei der Kommunikation auf Powerline (PLC). Diese läuft über den Control Pilot, also einer der sieben Pins, die auf dem Typ 2-Stecker vorhanden sind. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass das Protokoll auch für DC-Laden funktioniert. So wird vermieden, dass für AC und DC-Laden auf zwei Stecker gesetzt werden muss.



außerdem den Kunden einen Mehrwert, indem es den Ladevorgang verlässlich und anlagenschonend durchführt. Schließlich ist es nötig, um die öffentliche Ladestruktur so kundenfreundlich wie möglich zu machen. Der internationale Standard ISO/IEC 15118 vereinheitlicht die verwendeten Technologien, so dass der Nutzer in Zukunft mit seinem Elektroauto zumindest an jeder europäischen Ladesäule den gleichen Komfort vorfindet.

Die Ladestation als Bindeglied zwischen Elektrofahrzeug und Versorgungsnetz

Volker Lazzaro

Mennekes Elektrotechnik GmbH & Co. KG

Abstract

Beim Thema Ladestation geht es um viel mehr als nur um den richtigen Stecker. Entscheidend ist vielmehr eine gut abgestimmte Mischung aus elektrotechnischer Hardware und intelligenten IT-Lösungen. Die Ladestation muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen: u. a. Sicherheit, Komfort, Integration in ein Business Backend, Beherrschen der gängigen Lademodi. Sind mehrere Ladestationen an einem Ortsnetz installiert, müssen diese für einen sicheren Betrieb vernetzt werden. Eine Möglichkeit der zentralen Überwachung und Ansteuerung mehrerer Ladepunkte bieten E-Mobility Leitstände.

Ladestation und Ladestecker sind die Verbindung des Autos zum Stromnetz. Bei der Betrachtung beider Komponenten wird schnell klar, dass es hier nicht nur um den richtigen Stecker oder die richtige Ladestation geht sondern um eine gut abgestimmte Mischung aus elektrotechnischer Hardware und intelligenten IT-Lösungen. Nur ein solches Gesamtsystem kann die Herausforderungen sicheren und effektiven Ladens meistern.

Der Ladestecker

Für das Laden von Elektroautos sind weltweit derzeit drei Steckertypen geläufig.

Beim Ladestecker Typ 1 handelt es sich um einen in Japan entwickelten Einphasen-Ladestecker ausschließlich für den fahrzeugseitigen



Ladeanschluss. Die maximale Ladeleistung beträgt 7,4 kW bei 230V AC. In einer modifizierten Form ist er auch in den USA favorisiert.

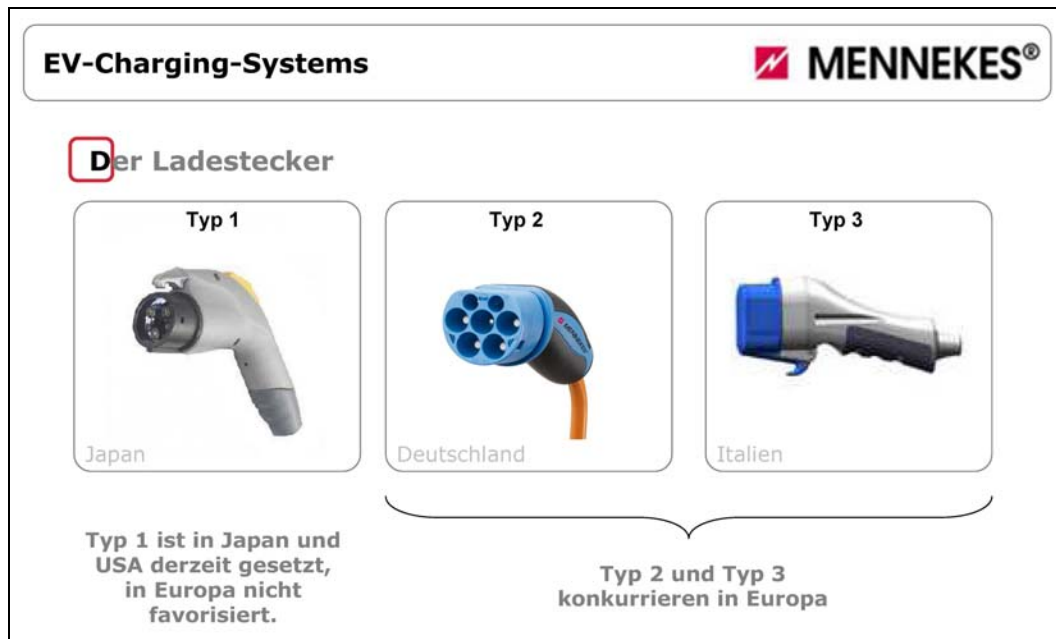


Abbildung 28: In der IEC 62196-2 genormte Systeme

Der in Deutschland unter Federführung von Mennekes entwickelte Typ 2 bietet das größte Leistungsspektrum und die größte Flexibilität. Die Steckvorrichtungen können sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Infrastrukturseite eingesetzt werden. Mit ihm können bei einer Anschlussspannung von 230V einphasig bzw. 400V dreiphasig Ladeleistungen von 3,7 kW bis 43,5 kW übertragen werden – bei identischer Steckergeometrie, die nicht größer ist als ein 16A CEE-Stecker. Der Stecker Typ 2 wurde im November 2009 in der VDE-Anwendungsregel VDE-AR-E 2623-2-2 standardisiert. Sogar die Nutzung als DC-Ladesteckvorrichtung für Leistungen bis 38 kW ist vorgesehen. Ergänzt um zwei zusätzliche Leistungskontakte entsteht das Combo-System, mit welchem Ladeleistungen bis 170 kW bei 850V DC möglich sind.

Aufgrund der umfassenden elektronischen Sicherheitsarchitektur benötigt der Typ 2 keinen mechanischen Berührungsschutz in Ladestecker und -kupplung. Die Folge: Ladesteckvorrichtungen Typ 2 sind langlebig und wartungsfrei.

Der Stecker Typ 3 wurde in Italien entwickelt. Er eignet sich bei einer Anschlussspannung von 230V einphasig bzw. 400V dreiphasig für Ladeleistungen von 3,7 kW bis 43,5 kW. Für die unterschiedlichen



Leistungsstufen sind drei verschiedene Steckergeometrien erforderlich, die nicht miteinander kompatibel sind. Das System verfügt über einen mechanischen Zugangsschutz zu den Kontakten. Eine Erweiterung zum Combo-System ist nicht vorgesehen.

Welcher Stecker für Europa?

Gemäß der aktuell veröffentlichten internationalen Norm IEC 62196-2 können alle drei Steckvorrichtungstypen verwendet werden. Aus Sicht der Verbraucher ist jedoch zumindest für Europa ein einziges System wünschenswert, denn nur eine einheitliche Anschlusstechnik ermöglicht es, die Fahrzeugbatterie überall problemlos aufzuladen, um so Mobilität grenzüberschreitend zu gewährleisten.

Die in der ACEA organisierten 16 europäischen Fahrzeughersteller sowie die meisten Energieerzeuger und Netzbetreiber favorisieren die Ladesteckvorrichtung Typ 2. Auch die Verbände BdEW, VDA, VDE und ZVEI empfehlen in Europa die Steckvorrichtung Typ 2.

Sicherheit

Damit das Laden von Elektrofahrzeugen sicher und bequem erfolgen kann, verfügen moderne Ladesysteme über ein mehrstufiges, redundantes Sicherheitskonzept. Hierzu gehören:

- Wegfahrschutz: Ein eigener Stromkreis prüft, ob der Ladestecker angesteckt ist. Ein versehentliches oder nicht-autorisiertes Ausreißen des gesteckten Ladekabels ist ausgeschlossen.
- Mechanischer Schutz: Der Ladestecker ist so ausgelegt, dass selbst das Überfahren des Steckers kein Risiko darstellt.
- Elektrischer Schutz: Ein zum Wegfahrschutz redundanter zweiter Stromkreis prüft, ob der Ladestecker vollständig eingesteckt ist.
- Fehlerstromschutz: Der aus Hausinstallationen bekannte Fehlerstromschutz wird ebenfalls genutzt.
- Überlastungsschutz: Elektrische Widerstände in den Ladesteckern kodieren den zulässigen Einsatzbereich des Ladekabels.

Komponentenschutz: Das Fahrzeug erhält in fortschrittlichen Lademodi außerdem die Information, welcher Strom von der Ladestation zur Verfügung gestellt wird und für welchen Maximalstrom das Ladekabel ausgelegt ist. Es wird auch überprüft, ob die Verbindung inklusive Schutzleiteranschluss korrekt hergestellt wurde und ob die



Steckvorrichtungen verriegelt wurden. Erst wenn alle Parameter als korrekt erkannt wurden, kann der Ladestrom fließen.

Aufgrund der umfassenden elektronischen Sicherheitsarchitektur benötigen Stecker und Kupplungen Typ 2 keinen mechanischen Berührungsschutz, der verschleifen kann. Sie sind deshalb wartungsfrei und dauerhaft betriebssicher.

Ladestation und vernetzte Ladeinfrastrukturen

Eine Ladestation kann aus mehreren Perspektiven betrachtet werden. Sie ist eine Steckdose, eine Energieverteilung im Außenbereich, eine Ladeeinrichtung und eine Kommunikationseinrichtung. Zu all diesen Funktionen gibt es bereits bestehende Normen oder Normen, die extra für Ladestationen geschrieben bzw. erweitert wurden. Moderne Ladestationen sind weit mehr als nur Steckdosen für Elektroautos. Sie stellen Sicherheitsfunktionen zur Verfügung, sie gewährleisten die Kommunikation zwischen Auto und Stromnetz. Schließlich übernehmen sie auch Autorisierung und Abrechnung. All diese Anforderungen machen Ladestationen zu komplexen IT-Systemen.

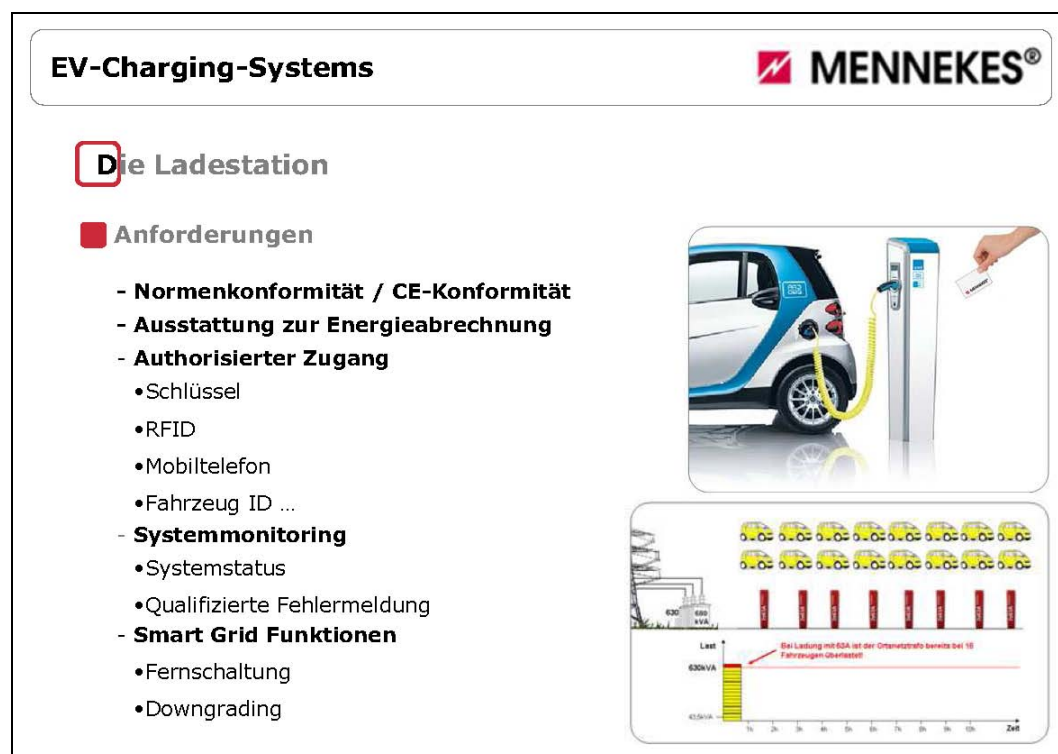


Abbildung 29: Anforderungen an die Ladestation



Vernetzte Ladeinfrastrukturen kommen überall dort zum Einsatz, wo mehrere Ladestationen installiert, zentral gesteuert und überwacht werden sollen. Dabei unterscheidet man zwei Bereiche mit unterschiedlichen Anforderungen an die Ladeinfrastruktur.

Der zukünftig größte Bereich ist der sogenannte private und halb-öffentliche Bereich. Hierzu gehören Parkplätze, Parkhäuser und Tiefgaragen zum Beispiel bei Hotels, Banken und Versicherungen, Einkaufszentren und Kaufhäusern genauso wie Autohäuser mit Werkstatt und Industrieunternehmen mit ihren Mitarbeiter- und Kundenparkplätzen. Ladeinfrastrukturen im privaten und halb-öffentlichen Bereich werden überwiegend durch das Elektrohandwerk errichtet.

Ladeinfrastrukturen im öffentlichen Bereich werden von Energieversorgern und Netzbetreibern zum Beispiel an öffentlichen Straßen oder an Bahnhöfen und Flughäfen errichtet. An diese Ladeinfrastrukturen werden höhere Anforderungen gestellt. Ladesysteme für den öffentlichen Bereich werden kundenindividuell projektiert und parametrieren. Der Betrieb erfolgt vielfach in Verbindung zu spezieller und individueller Software, die für jeden Betreiber anders aussehen kann. Die Projektierung im öffentlichen Bereich erfordert einen direkten Dialog zwischen Hersteller und Betreiber.

Eine Ladeinfrastruktur besteht aus mehreren Ladestationen und einem E-Mobility Leitstand als lokalem Backend. Die Anbindung der Ladestationen an den E-Mobility Leitstand kann auf mehrere Arten erfolgen. Bei Ladeinfrastrukturen mit bis zu 16 Ladepunkten erfolgt die Anbindung der Ladestationen an den E-Mobility Leitstand direkt per RS485 BUS. Für den Aufbau größerer Ladeinfrastrukturen gibt es Controller, welche bis zu 64 Ladepunkte adressieren können. Diese E-Mobility Controller kommunizieren über ein Ethernet LAN mit dem E-Mobility Leitstand. Für die Anbindung kann auch das vorhandene Intranet genutzt werden. Für Ladeinfrastrukturen im öffentlichen Bereich gibt es auch die Möglichkeit der Mobilfunk-Anbindung, da eine Leitungs-Anbindung an das Backend des Betreibers in den meisten Fällen nicht möglich ist.

E-Mobility Leitstand

Zentrales Element ist der E-Mobility Leitstand. Er verwaltet die Freigabe der einzelnen Ladepunkte und schaltet diese nach erfolgreicher Autorisierung frei. Der E-Mobility Leitstand kann als Wand- oder Tischgerät genutzt werden. Es stehen mehrere Autorisierungsmöglichkeiten zur Verfügung, die



auch parallel genutzt werden können. Die Autorisierung via RFID-Karte und die Handy-Autorisierung per SMS setzen voraus, dass die Mobilfunknummer bzw. die RFID-Kartennummer vorher in einer Kundendatenbank im E-Mobility Leitstand registriert wurden. Der E-Mobility Leitstand gleicht die Mobilfunknummer bzw. die RFID-Kartennummer mit der Kundendatenbank ab und gibt den entsprechenden Ladepunkt bei Übereinstimmung frei. Außerdem ist auch eine manuelle Freischaltung der Ladepunkte vom E-Mobility Leitstand aus möglich.

Die Autorisierung des Kunden erfolgt direkt am Ladepunkt. Bei Nutzung der RFID-Autorisierung hält der Nutzer einfach die Karte vor die Ladesteckdose. Das Auslesen der Daten erfolgt automatisch und der Ladepunkt wird bei erfolgreicher Autorisierung sofort freigeschaltet.

Bei der Handy-Autorisierung sendet der Nutzer eine SMS mit der Kennung des Ladepunktes an die entsprechende Mobilfunknummer. Wenn die Handy-Nummer in der Kundendatenbank registriert ist, wird der entsprechende Ladepunkt freigeschaltet.

Fazit

Durch ein auf die nationalen und internationalen Normungen abgestimmtes, differenziertes Produktprogramm sind die Voraussetzungen für einen flächendeckenden und grenzüberschreitenden Aufbau einer Ladeinfrastruktur heute gegeben. Öffentliche und private Akteure können auf bewährte Lösungen zurückgreifen, um ihren Bedürfnissen entsprechend Ladepunkte aufzubauen.



Elektromobilität im VDE

Elektromobilität ist ein wichtiges Querschnittsthema im VDE, das zentrale Bereiche aus Wissenschaft, Normung und Prüfung einbindet: Im Juli 2012 hat der VDE sein neues Batterie- und Umwelttestzentrum eröffnet, VDE-Experten beteiligen sich intensiv in verschiedenen Arbeitsgruppen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). Innerhalb der für die Normung zuständigen Arbeitsgruppe 4 haben die VDE-Normungsorganisation DKE mit dem DIN und dem VDA im Februar 2012 die zweite Stufe der deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität verabschiedet. Der VDE unterstützt das Förderprogramm „IKT für Elektromobilität II – Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) durch Begleitforschung. Regelmäßig veröffentlicht der VDE Studien zu Themen rund um die Elektromobilität und Energiewende. Mehr Infos finden Sie unter www.vde.com/infocenter und www.vde.com/e-mobility

Ihre Ansprechpartner im VDE:

Wissenschaft / Begleitforschung

Dr. Thomas Becks, Leiter Technik und Innovation, Telefon: 069-6308-311,
thomas.becks@vde.com

Normung

Dr. Stefan Heusinger, Leiter Standardisierung im VDE, Telefon: 069-6308-263,
stefan.heusinger@vde.com

Prüfung

Heiko Sattler, Leiter Kompetenzzentrum Batterien und Brennstoffzellen im VDE-Institut, Telefon: 069-8306-8620, heiko.sattler@vde.com

Dr. Stephan Kloska, Leiter EMV-und Akustik-Testzentrum im VDE-Institut,
Telefon: 069-8306-747, stephan.kloska@vde.com