

Die Sicherheit elektrisch betriebener Fahrzeuge ist ein wichtiger Aspekt im Rahmen ihrer Markteinführung. Besonders die Batterie und die Hochspannungskabel bergen hohe Gefahrenpotenziale. Holger Hirsch beschäftigt sich mit dem Thema der elektrischen Sicherheit von Elektrofahrzeugen und dem sicheren Umgang mit diesen Fahrzeugen durch Einsatz- und Rettungskräfte im Falle eines Unfalls. Er analysiert die gängigen Sicherheitsstandards und Zulassungsverordnungen und erarbeitet technische sowie organisatorische Konzepte zur Sicherheit der elektrischen Fahrzeuge.

Achtung, Elektroauto!

Elektromobilität, elektrische Sicherheit und Gefahrenabwehr

Von Holger Hirsch, Robert Hoffmann und Sebastian Jeschke

Elektrische Sicherheit von Elektrofahrzeugen und Verbesserungspotenziale durch Normung und Sicherheitsmaßnahmen

Elektromobilität ist im Verbund mit Themen wie „Smart Grids“ und dem Ausbau regenerativer Energien ein wichtiger Beitrag zur Minderung von CO₂-Emissionen und Treibhauseffekten. Elektrisch angetriebenen Fahrzeugen im Individualverkehr kommt damit große Bedeutung bei der CO₂-Reduktion zu. Vollkommen CO₂-freies Fahren muss jedoch im Zusammenhang mit dem Ausbau der regenerativen Energieerzeugung gesehen werden, da nur so die Fahrzeuge auch CO₂-frei geladen werden können. Die Bundesregierung hat daher in ihrem Meseberger Beschluss die Förderung des Ausbaus von erneuerbaren Energien und der Elektromobilität als Ziel formuliert.¹ Dazu sollen bis zum Jahre 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.

Um dieses Ziel zu erreichen müssen einerseits die Fahrzeuge weiterentwickelt und bereitgestellt werden und zum anderen eine geeignete Ladeinfrastruktur aufgebaut werden, um elektrisch angetriebene Fahrzeuge trotz ihrer Reichweitenachteile für den Endkunden interessant zu machen. Im Rahmen des nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität² wurden in Deutschland acht Modellregionen eingerichtet, in denen durch Flottenversuche die Einführung von Elektrofahrzeugen eingehender erforscht wird.

Mit der Elektromobilität ist nun eine neue Schnittstelle zwischen der Automobilindustrie und der elektrotechnischen Industrie entstanden, die eine intensive Zusammenarbeit dieser beiden Industriezweige erfordert. Zum einen müssen die Fahrzeuge am bestehenden Niederspannungsnetz der Energieversorger geladen werden, was eine ganz reale Schnittstelle dieser beiden Industrien an der Ladesäule darstellt. Zum anderen haben Fahrzeuge mit

elektrischem oder teilelektrischem Antrieb zusätzlich zum normalen 12 V-Bordnetz ein so genanntes Hochvolt-Bordnetz, das den elektrischen Antrieb mit Energie versorgt. Für die Automobilindustrie ist dies ein Fahrzeug mit einer erhöhten Bordnetzspannung, für die Elektrotechniker hingegen ist ein Elektrofahrzeug eine fahrende Niederspannungsanlage, für die im Bezug auf die Sicherheit die gängigen Niederspannungsrichtlinien angewandt werden müssen. Gerade letztere Sichtweise offenbart die Notwendigkeit von sicherheitstechnischen Entwicklungen, weil elektrische Anlagen selten in derart unsicheren Betriebsumgebungen operieren: Denn in Bezug auf den Individualverkehr muss realisiert werden, dass der Verkehrsunfall, ob nun mit leichten, schweren oder Totalschäden, ein statistisch gesehen gängiger Betriebszustand von Kraftfahrzeugen ist.

Aufgrund dieser Tatsache sind bei der Weiterentwicklung und Ein-



Holger Hirsch. Foto: Max Greve

Internationale Zusammenarbeit/Liason mit anderen Organisationen					Priorität allgemein niedrig mittel hoch
Internationalität der Normung					
Ladestationen	Elektrische Sicherheit		HIV-Bohrprozess		
Batteriesicherheit					
Fahrzeug/Systeme		Funktionale Sicherheit			
Externe Schnittstellen & Kommunikation					
Induktives Laden	Reboot Grid		Dyn. Lastmanagement		
Smart Grid fähig	Ladeschnelleitelle				
Rettungsleitfäden	Batteriesystem		Unfall		
Ladestationen	Fahrzeug/Systeme				
EMV					
Leistungs- & Verbrauchsmerkmale					
Umgebungsbedingungen					
2010	2012	2014	2017	2020	

(1) Zeitplan für die Empfehlungsumsetzung der Normungsroadmap.
 Quelle: Deutsche Normung-Roadmap Elektromobilität

führung von Elektrofahrzeugen die gängigen Normen und Zulassungsverordnungen – speziell im Bereich der elektrischen Sicherheit – zu untersuchen und entsprechend anzupassen.

Im Bereich der Normung und Standardisierung hat der VDE-/DKE in Zusammenarbeit mit dem VDA/DIN die deutsche Normungsroadmap E-Mobility³ erstellt. Diese befasst sich mit Fragen zur Normung rund um das Thema der Elektromobilität. Wichtige Themen aus dieser Roadmap sind die Ladestationen, die Elektrofahrzeuge und die Schnittstellen zur Energie sowie zur Datenübertragung. Das Thema der elektrischen Sicherheit dieser Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur wird in der Roadmap explizit genannt und als wichtiges Thema priorisiert. Der aktuell in der Normungsroadmap festgelegte Zeitplan ist in Abbildung (1) zu sehen.

Die Universität Duisburg-Essen ist in der Modellregion Rhein-Ruhr aktiv. Im Rahmen des Projekts *colognE-Mobil* forschen diverse Lehrstühle am Thema Elektromobilität. Unser Fachgebiet Energie-transport und Speicherung beschäftigt sich in Kooperation mit dem

Fachgebiet elektrische Anlagen und Netze in diesem Zusammenhang mit dem Thema der elektrischen Sicherheit von Elektrofahrzeugen und dem sicheren Umgang mit diesem Fahrzeugen durch Einsatz- und Rettungskräfte im Falle eines Unfalls. Hierzu werden die gängigen Sicherheitsstandards und Zulassungsverordnungen analysiert und technische sowie organisatorische Konzepte erarbeitet, um die elektrische Sicherheit der Fahrzeuge zu verbessern.

Arten des elektrischen Antriebs heute

Es gibt heute bereits eine Vielzahl von Antriebskonzepten, die einen elektrischen Motor verwenden, um entweder vollständig auf Kraftstoff zu verzichten oder Kraftstoff durch einen unterstützenden Elektromotor einzusparen. Die Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb auch FEV (Full electric vehicle) oder BEV (Battery electric vehicle) genannt, beziehen die gesamte Antriebsenergie aus einer Batterie. Mit der heutigen Batterietechnologie sind Reichweiten bis zu 150 Kilometern typisch. Diese momentane maximale Reichweite

ist für 90 Prozent der alltäglichen Fahrten ausreichend⁴. Dennoch werden Weiterentwicklungen in der Batterietechnik erwartet, die zur Steigerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen beitragen sollen. Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb werden schon jetzt als Kleinserien produziert und in vielen Modellregionen getestet. Hier allerdings meist nur im innerstädtischen Bereich, um die Reichweitenachteile zu kompensieren. Für das Zurücklegen von größeren Entfernungen können Konzepte wie zum Beispiel EREV (electric range extended vehicle) oder FCEV (fuel cell electric vehicle) zum Einsatz kommen. Beim EREV wird der erste Teil der Strecke rein elektrisch zurückgelegt. Danach wird ein kleiner Verbrennungsmotor mit nachgeschaltetem Generator (Range Extender) verwendet, um die Batterie wieder zu laden und somit weiterhin den elektrischen Antrieb zu nutzen. Der Verbrennungsmotor wird beim Betrieb im optimalen Drehzahlbereich betrieben, wodurch der Kraftstoffverbrauch minimiert wird. Beim Brennstoffzellenfahrzeug ist das Prinzip ähnlich, mit dem Unterschied, dass die Energie für den Antrieb aus einer Brennstoffzelle gewonnen wird. Zuletzt sei noch auf die HEV (Hybrid electric vehicle) eingegangen. Dieses Antriebskonzept nutzt einen elektrischen sowie einen herkömmlichen Motor. Der Elektromotor wirkt dabei meistens unterstützend beim Anfahren sowie bei starkem Beschleunigen und bei Steigungen. Bei Voll-Hybrid Fahrzeugen ist allerdings auch ein rein elektrisches Fahren für einige Kilometer möglich. Hybridfahrzeuge wie zum Beispiel der Toyota Prius sind als Serienfahrzeuge bereits auf Deutschlands Straßen vertreten. Bei allen Antriebskonzepten kann prinzipiell die beim Abbremsvorgang entstehende Energie, die bei herkömmlichen Fahrzeugen in Form von Wärme verloren geht, teilweise zum Laden der Batterien zurückgewonnen werden.

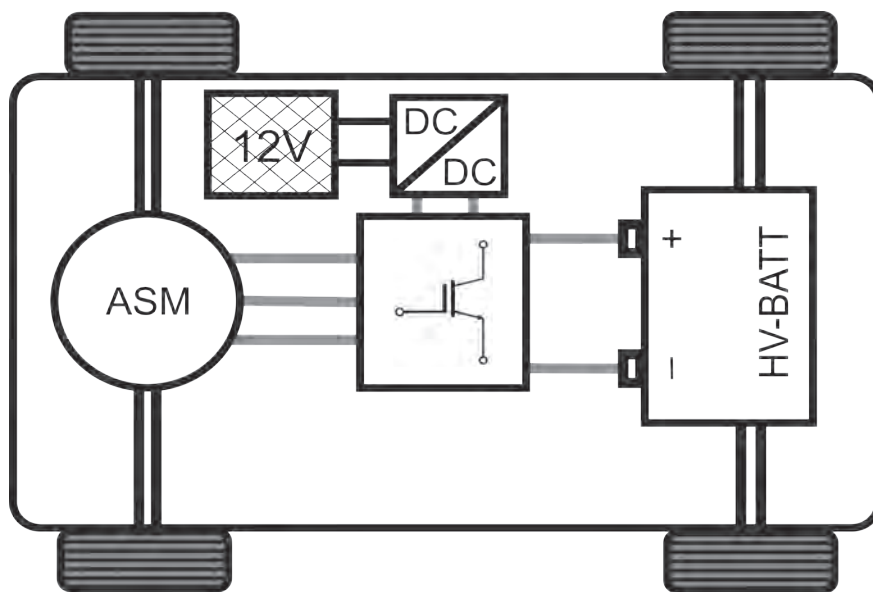
Das Antriebssystem von Elektrofahrzeugen

Im Gegensatz zu herkömmlichen Fahrzeugen, die mit einer Bordnetzspannung von 12 V (Volt) betrieben werden, werden bei Elektrofahrzeugen aufgrund der höheren benötigten Leistungen für den elektrischen Antrieb und den daraus resultierenden Stromwärmeverlusten, Spannungen im Bereich von 200 V bis 800 V eingesetzt. Da diese Spannungen nicht mehr unter die Schutzkleinspannung fallen, müssen aufgrund einer potenziellen Gefährdung für den Menschen zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen realisiert werden. Mit dem Begriff der Schutzkleinspannung sind Spannungen von 25 VAC und 60 VDC gemeint, bei denen selbst bei direkter Berührung keine Gefahr für den

wandeln. Somit können Asynchronmotoren beziehungsweise permanent erregte Synchronmotoren für den Antrieb des Fahrzeugs verwendet werden. Zusätzlich werden Verbraucher mit einer hohen Leistungsaufnahme, wie beispielsweise Heizungen und je nach Fahrzeugtyp auch der Klimakompressor an das HV-Bordnetz angeschlossen. In fast allen heutigen Elektrofahrzeugen wird ein DC-DC-Wandler eingesetzt, um das 12 V-Bordnetz mit dem HV-Bordnetz zu verbinden. Somit kann das 12 V-Bordnetz im Falle besonders hoher Leistungsaufnahme (viele Verbraucher gleichzeitig aktiv) vom HV-Bordnetz gestützt werden. Die verwendete Bordnetzspannung variiert mit dem Antriebskonzept. Bei Hybridfahrzeugen ist die Spannung aufgrund der geringeren Leistung des Elektromotors norma-

andere. Aus diesem Grund müssen bei einer flächendeckenden Einführung alle involvierten Personengruppen für diese Gefahrenquellen sensibilisiert werden.

Die Antriebsbatterie mit Spannungen zwischen 200 V und 800 V stellt besondere Anforderungen an die elektrische aber auch an die funktionale Sicherheit. Das Batteriesystem besteht aus vielen einzelnen Zellen mit einer Spannung von wenigen Volt, welche zum Erreichen einer höheren Gesamtspannung in Reihe geschaltet werden. Zwecks modularer Flexibilität werden mehrere Zellen zu einem Batteriepack kombiniert. Durch eine entsprechende Zusammenschaltung mehrerer Batteriepacks kann die benötigte Bordnetzspannung und die gewünschte Kapazität der Antriebsbatterie generiert werden. Die Ströme, die im Fehlerfall, also dem Kurzschluss eines oder mehrerer Batteriepacks auftreten, liegen zwischen 2.000 und 3.000 A (Ampere). Neben der Gefahr eines tödlichen elektrischen Schlags besteht im Kurzschlussfall durch das mögliche Auftreten von energiereichen Lichtbögen zusätzlich die Gefahr eines Brandes. Des Weiteren muss bei der Antriebsbatterie die Gefährdung durch chemische Reaktionen im Brandfall oder bei Austritt von Elektrolyt aus den Zellen berücksichtigt werden. Auf diesem Gebiet werden bereits umfangreiche Tests an Batteriezellen durch wissenschaftliche Institute und Batteriehersteller durchgeführt, um die Gefahren bei einer mechanischen Beschädigung oder Überhitzung der Zellen zu minimieren. In Abbildung (3) sind beispielhaft einige Ergebnisse solcher Tests, durchgeführt durch die Firma Valence INC., mit herkömmlichen Li-Ionen-Zellen zu sehen. Die Zellen wurden bei diesen Tests durch äußere mechanische Einwirkung beschädigt und bis zum Zusammenbruch der Zellspannung erhitzt. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass bei einer mechanischen Beschädigung der Zellen



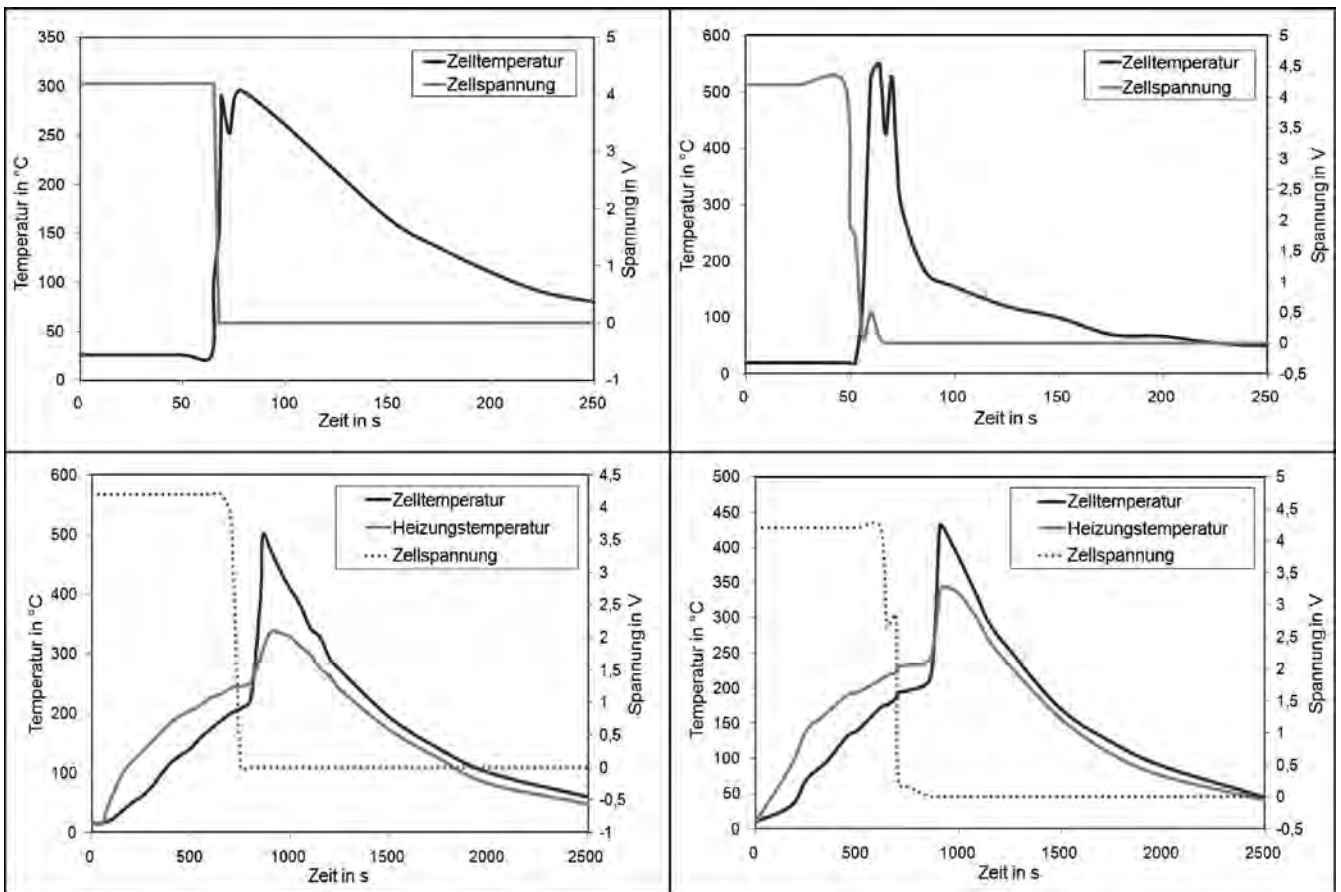
(2) Schema des HV-Bordnetzes eines Elektrofahrzeugs.

Menschen ausgeht. Abbildung (2) zeigt schematisch den Aufbau des Antriebssystems eines Elektrofahrzeugs. Das Hochvolt-Bordnetz eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs besteht im Wesentlichen aus einer Antriebsbatterie, einem Wechselrichter und einem Elektromotor. Der Wechselrichter wird benötigt, um die Gleichspannung der Batterie in eine dreiphasige Wechselspannung zu

lerweise geringer als bei vollständig elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

Neue Gefahrenquellen in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

Generell lässt sich sagen, dass Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb nicht sicherheitskritischer als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind. Allerdings sind die Gefahrenquellen



(3) Auszüge der Testergebnisse Batterietests der Firma Valence INC. (links oben Crushtest Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O₂-Zelle; rechts oben Crushtest LiCoO₂-Zelle; links unten Temperaturtest Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O₂-Zelle; rechts unten Temperaturtest LiCoO₂-Zelle).
Quelle: Testbericht Valence INC.

die Zellspannung zusammenbricht und gleichzeitig die Temperatur bedingt durch den internen Kurzschlussstrom ansteigt. Bei den Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O₂-Zellen steigt die Temperatur bedingt durch den Kurzschluss auf etwa 300°C und bei den LiCoO₂-Zellen kann die Temperatur sogar auf über 500°C ansteigen. Auch bei den Ergebnissen der Temperaturtests bricht die Zellspannung bei externen Temperaturen von ungefähr 200°C für beide Zelltypen zusammen. Durch den Fehlerstrom steigen die Zelltemperaturen auf 500°C bei der Li(Co_{1/3}Ni_{1/3}Mn_{1/3})O₂-Zelle und auf 450°C bei der LiCoO₂-Zelle. Durch diesen starken Anstieg der Zelltemperaturen im Fehlerfall kann eine Kettenreaktion ausgelöst werden, bei der weitere benachbarte Zellen durch diesen Temperaturanstieg ebenfalls beschädigt werden. Die Antriebsbatterie besitzt also ein erhebliches

Gefahrenpotenzial. Robustes Design sowie die kontinuierliche Zellüberwachung in Kombination mit einem geeigneten Kühlsystem ist notwendig, um die Wahrscheinlichkeit für einen internen Batteriekurzschluss zu minimieren.

Durch die hohen Spannungen im Antriebsbordnetz besteht im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein verändertes Gefahrenspektrum. Zwar ist das primäre Brandrisiko durch das Wegfallen von mitgeführtem Kraftstoff gebannt, aber im Fehlerfall – zum Beispiel bei Zerstörung der Isolation – können gefährlich hohe Spannungen und Kurzschlüsse im Fahrzeug auftreten, die eine erhebliche Gefahr für die Fahrzeuginsassen zur Folge hätte. Deshalb sollten alle Komponenten des Bordnetzes möglichst so verbaut sein, dass Isolationsfehler in allen Betriebszuständen des Fahrzeugs vermieden werden. Des Weiteren

sind der Motor und der Wechselrichter so auszulegen, dass kritische Systemzustände durch Fehlfunktionen der Komponenten beziehungsweise der HV-Kabel verhindert werden.

Damit sind Sicherheitssysteme zu implementieren, die eine sichere Fehlerdetektion und eine automatische Abschaltung des Antriebsystems über eine Trennung der Batterie gewährleisten und somit Gefährdungen von Fahrzeuginsassen oder Rettungskräften im Falle eines Unfalls verhindern. Bei dieser Abschaltung sollte durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden, dass sicherheitsrelevante Fahrzeugfunktionen, wie zum Beispiel Bremskraftverstärker oder Servolenkung funktionsfähig bleiben, damit das Fahrzeug bei einem Antriebsausfall weiterhin abbremst- und lenkbar bleibt.

Aktueller Stand der Zulassungsanforderungen für Elektrofahrzeuge

Die für den Straßenverkehr zugelassenen Hybrid und Elektrofahrzeuge müssen in der EU die Bedingungen der Zulassungsverordnung ECE R-100 erfüllen. Danach wird gefordert, dass das Hochvolt-Bordnetz durch einen nicht weiter spezifizierten Mechanismus abschaltbar sein muss. Des Weiteren muss ein Schutz von Personen gegen das direkte Berühren von spannungsführenden Teilen durch Schutzabdeckungen gewährleistet werden. Diese Abdeckungen sind entsprechend mit Warnhinweisen zu kennzeichnen. Im Fahrgastraum und im Gepäckraum muss eine Schutzklasse von IPXXD (spannungsführende Teile sind nicht mit einer Prüfsonde mit einem Durchmesser von zwei Millimetern berührbar) und im restlichen Fahrzeug sowie nach dem Entfernen von Schutzabdeckungen muss eine Schutzklasse von IDXXB (spannungsführende Teile sind nicht mit einem Prüffinger berührbar) eingehalten werden. Der Schutz gegen indirektes Berühren (Berühren von leitenden Teilen, die im Fehlerfall unter Spannung stehen) muss durch eine ausreichende Isolation gewährleistet werden. Hierfür wird ein minimaler Wert für den Isolationswiderstand von $100 \Omega/V$ der Batterienennspannung (bei einer Batteriespannung von 400 V ergibt sich somit ein Isolationswiderstand von 40 k Ω) gefordert, wenn das Fahrzeug über eine permanente Isolationsüberwachung verfügt. Bei Fahrzeugen ohne Isolationsüberwachung ist ein minimaler Isolationswiderstand von $500 \Omega/V$ einzuhalten. Die Funktionsweise einer solchen Isolationsüberwachung wird im nächsten Abschnitt eingehender erläutert. Ein weiterer Punkt ist, dass eine Widerstandsmessung zwischen den leitenden Teilen des Fahrzeugs durchgeführt werden muss. Bei dieser Messung darf der Widerstand zwischen zwei beliebigen leitenden Teilen nicht mehr als 0,1 Ω betragen,

damit im Fehlerfall keine hohen Spannungen an berührbaren Teilen (Karosserie) auftreten.

In den Vereinigten Staaten werden diese Fahrzeuge nach der amerikanischen Verordnung FMVSS305 zugelassen. Diese verlangt zusätzlich zu den oben beschriebenen Anforderungen, dass die Fahrzeuge NCAP Crashtests unterzogen werden müssen. Nach dem Crash darf der Isolationswiderstand nicht unter einen Wert von $500 \Omega/V$ abfallen. Des Weiteren dürfen keine Komponenten des Antriebsbordnetzes in den Fahrgastraum eindringen oder aus dem Fahrzeug geschleudert werden. Es wird zusätzlich empfohlen, dass die Spannung zwischen den Batteriepolen und der Karosserie fünf Sekunden nach dem Crash (nach automatischer Abschaltung) unter 60 VDC (entspricht der Schutzkleinspannung) abgefallen sein sollte.

In Japan gelten für die Zulassung von Elektrofahrzeugen die Attachments 101, 110 und 101. Auch hier werden ähnlich wie in der amerikanischen Verordnung Crashtests mit den Fahrzeugen durchgeführt. Zusätzlich wird hier auf die zulässigen Abschaltzeiten für den Personenschutz eingegangen. Es werden verschiedene Fehlerströme über einen Widerstand parallel zur Isolation realisiert und die Zeit gemessen,

die das System benötigt, um die Batterie zu trennen. Bei einer Stromflussdauer von zehn Millisekunden sollte der Strom bei 200 mA abgeschaltet werden. Bei einer Dauer von mehr als zwei Sekunden sollte der Strom bereits bei einem Wert von 26 mA abgeschaltet werden.

Stand der Technik im Bezug auf die Sicherheit von Elektrofahrzeugen

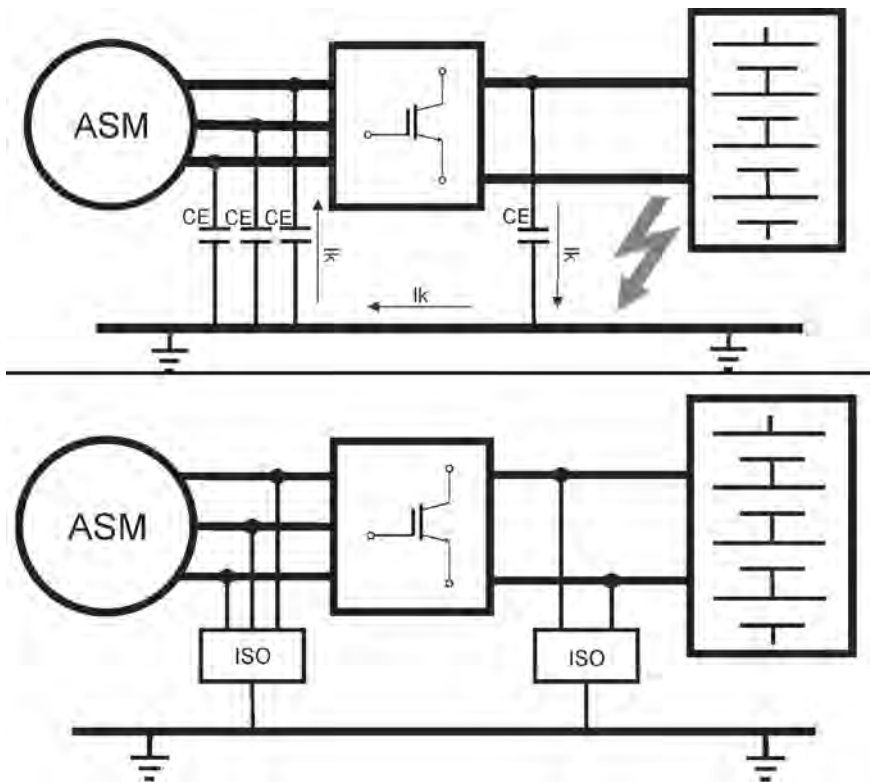
Zusätzlich zu den in den Zulassungsvorschriften geforderten Sicherheitsmaßnahmen, wie beispielsweise des Schutzes gegen direktes und indirektes Berühren, haben viele Hersteller von Elektrofahrzeugen weitere Schutzmaßnahmen realisiert.

Im Bezug auf den sicheren Umgang mit Elektrofahrzeugen, im Falle von Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie bei Rettungseinsätzen, ist es von großer Bedeutung das Fahrzeug eindeutig als Elektrofahrzeug identifizieren zu können. Hierzu haben die Hersteller, speziell von Hybridfahrzeugen, bereits spezielle Kennzeichnungen an den Fahrzeugen realisiert, mit denen eine Identifikation von außen, von innen und im Motorraum möglich ist. Des Weiteren sind die Gehäuse der HV-Bordnetzkomponenten mit entsprechenden Warnhinweisen versehen und die Kabel in der Farbe Orange



(4) Kennzeichnungen von Elektrofahrzeugen (Renault ZE, Toyota Prius, Mitsubishi i-MiEV, Mini E, Ford Escape, Nissan Altima Hybrid).

Quelle: Internetpräsenz der jeweiligen Hersteller



(5) oben: IT-Bordnetzaufbau von Elektrofahrzeugen; unten: Isolationsüberwachung im HV-Bordnetz.

ausgeführt. In Abbildung (4) sind einige Beispiele von aktuell realisierten Kennzeichnungen abgebildet.

Das Antriebsbordnetz ist im Normalfall als IT-Netz, also vollständig isoliert von der Fahrzeugkarosserie, aufgebaut. Diese Netzform hat den Vorteil, dass bei einem einzelnen Isolationsfehler, wie in Abbildung (5) oben zu sehen, nur ein geringer Fehlerstrom über die Erdkapazitäten C_E fließen kann. Beim Auftreten eines ersten Isolationsfehlers muss das System somit nicht direkt abschalten, sondern nur eine Warnung an den Fahrer ausgeben und eventuell die Leistung des Fahrzeugs drosseln, bis eine entsprechende Wartung durchgeführt wird. Aufgrund der Tatsache, dass ein einzelner Fehler nicht zur Systemabschaltung führt, findet diese Netzform auch in anderen sensiblen Bereichen, wie Krankenhäusern (OP-Säle) und im Bergbau Anwendung.

Zur Detektion von Isolationsfehlern wird ein Isolationsüberwachungssystem verwendet. Der

prinzipielle Aufbau eines solchen Systems ist in Abbildung (5) illustriert. Es gibt mehrere Methoden, um die Isolation zu überwachen. Die Messeinrichtung wird zwischen den Batteriepolen und der Karosserie installiert und überwacht den Strom, der über den internen Widerstand ($R \geq 10\text{M}\Omega$) des Geräts fließt. Aus den beiden gemessenen Strömen und der Spannung lässt sich der Isolationswiderstand des Systems bestimmen. Bei einer Unsymmetrie der Ströme beziehungsweise der Widerstände liegt ein einzelner Isolationsfehler vor und entsprechende Maßnahmen, wie oben bereits erläutert, werden eingeleitet. Des Weiteren werden bei einem Überschreiten einer bestimmten Ansprechschwelle für den Fehlerstrom automatisch entsprechende Aktionen beziehungsweise Deaktivierungsprozeduren eingeleitet. Eine andere Methode der Messung ist die Einkopplung eines zusätzlichen Messsignals (Messpuls) auf das HV-Bordnetz (AMP-Methode⁵). Beim Auftreten eines Isolationsfehlers im System verändert sich dieses einge-

koppelte Signal. Diese Veränderung wird detektiert und somit der Fehler erkannt. Vorteil des Systems ist, dass bei eingeschaltetem Wechselrichter das gesamte System durch die Leistungselektronik hindurch überwacht werden kann. Auch die ungefähre Position des Fehlers im Bordnetz kann anhand der detektierten Signalveränderung bestimmt werden.

Ein weiteres Sicherheitssystem, welches in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommt, ist der HVIL (High Voltage Interlock Loop). Mit dieser Einrichtung lässt sich auf einfache Weise eine Unterbrechung im HV-Bordnetz detektieren. Hierzu wird eine Signalleitung parallel zu den HV-Leitungen im kompletten Antriebsnetz verlegt. Beim Abreißen von Leitungen oder Steckverbindungen durch mechanische Belastung zum Beispiel im Crashfall würden bei ausbleibender Abschaltung energiereiche Längslichtbögen entstehen, die aufgrund der geringen Bogenbrennspannung nicht unbedingt von der Isolationsüberwachung erkannt werden. Durch den Einsatz eines HVIL wird die Ursache für einen solchen Lichtbogen durch eine Durchtrennung der parallelen Signalleitung detektiert und das System vor dem Abreißen der Versorgungsleitung beziehungsweise des Steckers deaktiviert. Zusätzlich zu den Komponenten des Antriebsnetzes sollten Schutzabdeckungen und die Ladesteckvorrichtung in dieses Sicherheitssystem eingebunden werden. Beim Entfernen einer solchen Abdeckung oder des Ladesteckers beim Ladevorgang wird das Antriebssystem automatisch abgeschaltet beziehungsweise der Ladevorgang unterbrochen, um das Gefährdungsrisiko für Personen zu minimieren.

Wird das Fahrzeug in einen Unfall verwickelt, so sollte das Antriebssystem in jedem Fall deaktiviert werden. Hierzu werden die bereits in den Fahrzeugen vorhandenen Airbag-Sensoren verwendet. Bei Detektion eines Crashes werden

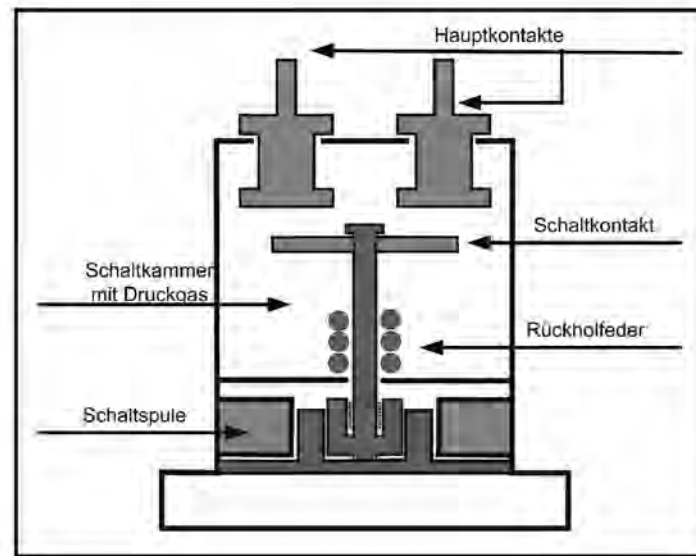
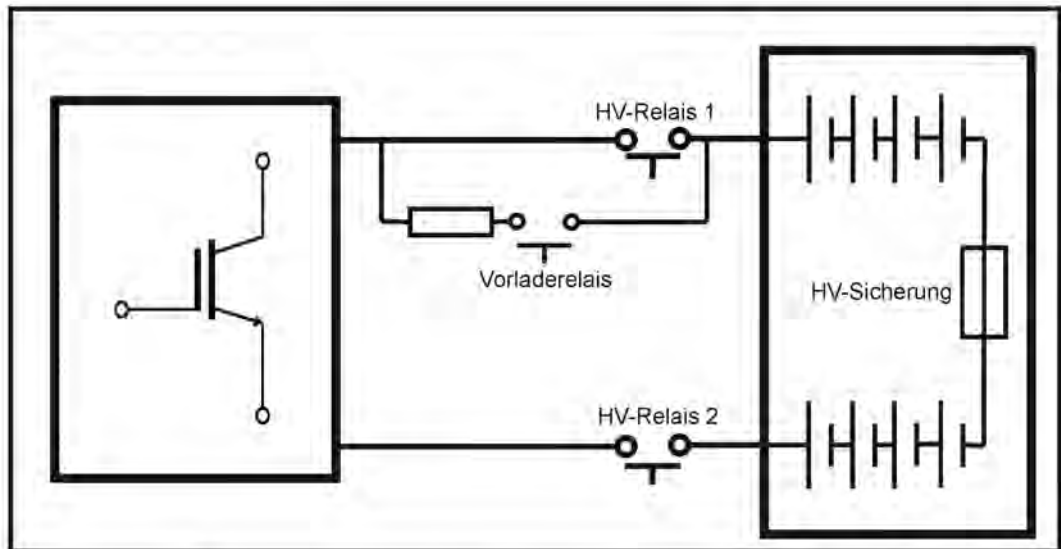
die Airbags ausgelöst und parallel die Deaktivierung des Antriebssystems initiiert. Hierdurch kann gewährleistet werden, dass sich das Fahrzeug auch nach einem Unfall in einem sicheren Zustand befindet und keine Gefahr für die Insassen und eventuell beteiligte Rettungskräfte besteht.

Alle beschriebenen Sicherheitssysteme werden in einem zentralen Steuergerät verarbeitet, welches je nach Situation im Antriebsbordnetz die entsprechenden Abschaltprozeduren einleitet. Dieses Steuergerät sollte ähnlich wie die Airbagsteuerung an einer möglichst robusten Stelle im Fahrzeug wie beispielsweise im Kardantunnel verbaut sein, um die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zu minimieren.

Zur Trennung der Antriebsbatterie wird im Normalfall eine Kombination aus HV-Relais und HV-Schmelzsicherungen verwendet. Somit wird gewährleistet, dass die Batterie in allen möglichen Situationen und Zuständen galvanisch vom Antriebsnetz getrennt und wieder zugeschaltet werden kann. Abbildung (6) zeigt den Aufbau des Abschaltsystems. Im Gegensatz zum Einsatz von Schaltern in Energieversorgungsnetzen, wo bei Kühlung des Lichtbogens ein Abriss während des Stromnulldurchgangs (energiearme Phase) erfolgt, liegt im Fahrzeug mit der Antriebsbatterie eine Gleichspannungsquelle vor. Dies erhöht den Kühlaufwand, der zum Löschen des Lichtbogens aufgewendet werden muss. Im normalen Betrieb und bei Wartungsarbeiten werden die HV-Relais für eine Abschaltung der Batterie verwendet. In diesem Betriebszustand befindet sich das Fahrzeug im Ruhezustand. Dies hat zur Folge, dass kein beziehungsweise nur ein geringer Strom über das Relais fließt und die

Abschaltung bzw. Löschung des Lichtbogens einfacher zu realisieren ist. Das HV-Relais 1 trennt in diesem Fall vor HV-Relais 2 bei voller Spannung und Lastabhängigem Strom. Es muss aber so ausgelegt sein, dass eine Trennung des Stromkreises auch unter Volllast durchgeführt werden kann. Der Vorladekreis wird verwendet, um den Einschaltstrom zu reduzieren. Hierzu werden beim Einschalten zuerst über den Vorladekreis die Zwischenkreiskondensatoren des Wechselrichters geladen. Erst wenn diese annähernd zu 100 Prozent geladen sind, wird der Stromkreis durch das HV-Relais 1 geschlossen. Beim Auftreten eines doppelten Kurzschlusses im Bord-

netz (z. B. beide Batteriepole an Masse), der mit Batteriespannungen von 200 bis 800 V und Fehlerströmen im kA-Bereich verbunden ist, reichen die HV-Relais nicht mehr aus, um den Stromkreis zu trennen. Allerdings müssen sie in der Lage sein diesen Kurzschlussstrom zu führen, bis der Stromkreis durch die Schmelzsicherung unterbrochen wird. Nach dem Ansprechen der Sicherung können dann die HV-Relais geschaltet werden. Die verwendeten Relais sollten aufgrund des Einsatzes im Fahrzeug möglichst kompakt ausgeführt sein. Abbildung (6) rechts zeigt den Aufbau eines solchen Relais der Firma TYCO Electronics⁶. Beim Öffnen



(6) Schaltung der HV-Relais in Kombination mit HV-Sicherung.

der Kontakte unter Last entsteht ein Lichtbogen in der Kontaktkammer. Durch ein spezielles Druckgasgemisch (Wasserstoff oder Stickstoff) in dieser Kammer und durch zusätzliche Löschmagnete, die den Lichtbogen aus der Schaltstrecke drängen, gelingt es auch unter Volllast den Stromkreis zu trennen.

Es liegt im Ermessen des Fahrzeugherstellers, ob und welche Sicherheitseinrichtungen er in das Fahrzeug integriert. Wie oben erwähnt, sind nicht alle beschriebenen Sicherheitssysteme, wie die Isolationsüberwachung oder der HVIL vorgeschrieben. Auch eine Kennzeichnung der Fahrzeuge beziehungsweise der verbauten Kabel ist nicht zwingend festgelegt. Des Weiteren muss bei einer Implementierung entschieden werden, wie beim Auftreten eines ersten Fehlers im IT-Netz reagiert werden soll. Reicht eine Warnung am Kombiinstrument aus oder soll auch die Leistung gedrosselt beziehungsweise das System abgebremst und dann ausgeschaltet werden? Nach welchen Kriterien ist das Antriebssystem nach einer fehlerbedingten Deaktivierung wieder einschaltbar?

Sicherheitskritische Probleme bei Elektrofahrzeugen

Die Nutzung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen kann allgemein in drei Zustände unterteilt werden: Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten, Normalbetrieb und Rettungs- und Bergungsarbeiten. Im Bereich der Wartungsarbeiten ist die neue BGG 8686⁷ von der DGUV bindend. Diese beschäftigt sich mit den Vorgehensweisen für den sicheren Umgang mit Elektrofahrzeugen im Werkstattbereich und in der Fertigung. Da in der Werkstatt beziehungsweise in der Produktionsstätte eine gesicherte Umgebung vorliegt, ist mit Beachtung der BG 8686 eine ausreichende Sicherheit für das Werkstattpersonal gegeben. Dieses muss allerdings durch entsprechende Schulungen für Arbeiten an Elektro-

fahrzeugen qualifiziert werden.

Im Normalbetrieb kommen die beschriebenen Sicherheits- und Überwachungssysteme zum Einsatz. Problematisch ist hier, dass derzeit für die Hersteller von Elektrofahrzeugen keine Pflicht besteht, diese Systeme im Fahrzeug zu integrieren. Lediglich die ECE R-100 muss für die Zulassung der Fahrzeuge eingehalten werden. Diese Verordnung war ursprünglich für die Zulassung von Gepäckfahrzeugen an Flughäfen oder Gabelstaplern vorgesehen und muss, wie auch in der DKE Normungsroadmap gefordert, an die neuen Anforderungen angepasst werden. Da Gepäckfahrzeuge und Gabelstapler im Normalfall nicht am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen und somit nicht in schwere Unfälle verwickelt werden, sind hier andere Sicherheitsvorkehrungen zu realisieren als bei Elektrofahrzeugen. Des Weiteren muss der Fahrzeugführer in der Bedienungsanweisung eindeutig auf die Gefahren, die bei einer unsachgemäßen Handhabung des Fahrzeugs auftreten können, hingewiesen werden. Eine Schwäche, der aktuellen Sicherheitssysteme in Elektrofahrzeugen ist die fehlende Redundanz an Abschalteinrichtungen. Die HV-Relais werden oft im Batteriepack integriert, welcher sich bei vielen Herstellern im hinteren Teil des Fahrzeugs befindet. Bei einem Aufprall treten hohe mechanische Kräfte am Batteriepack auf, welche die ordnungsgemäße Funktion der Relais beeinträchtigen können.

Im Falle von Rettungs- und Bergungsarbeiten an einem elektrisch angetriebenen Fahrzeug treten für die Rettungskräfte mehrere Probleme auf. Zum einen ist aufgrund der Tatsache, dass keine äußere Kennzeichnungspflicht für diese Fahrzeuge besteht, eine eindeutige Identifikation nicht immer möglich. Zum anderen muss vor dem Einleiten von weiteren Rettungsmaßnahmen das Antriebssystem des Fahrzeugs deaktiviert beziehungsweise sichergestellt werden, dass dieses spannungsfrei ist. Die Hersteller von Hybrid-

und Elektrofahrzeugen stellen so genannte „Emergency Response Guides“ für die Rettungskräfte zur Verfügung. In diesen wird erläutert, wie das Antriebssystem zu deaktivieren ist. Problematisch ist hierbei, dass diese Prozeduren herstellerspezifisch sehr stark variieren. Bei den meisten Fahrzeugen muss entweder die Zündung betätigt werden oder die 12 V-Batterie abgetrennt werden, um das Antriebsnetz zu deaktivieren. Dies kann aber je nach Einbauort der Batterie und der Art beziehungsweise Schwere des Unfalls stark erschwert werden. Des Weiteren verfügt das Antriebssystem zusätzlich zu der Li-Ionen-Batterie noch über weitere Energiespeicher, wie zum Beispiel die Zwischenkreiskondensatoren im Wechselrichter beinhaltet. Dies bedeutet, dass das HV-Bordnetz auch nach einer Abtrennung der Batterie noch für einen gewissen Zeitraum unter Spannung stehen kann. Ein weiteres Problem bei Rettungsarbeiten kann auftreten, da in den Fahrzeugen keine Funktion implementiert ist, um den Rettungskräften den Zustand des Antriebssystems anzuzeigen. Lediglich das Kombiinstrument der Fahrzeuge, welches nicht unbedingt einsehbar ist, gibt bei manchen Fahrzeugen Aufschluss über den aktuellen Systemzustand. Die in den „Response Guides“ beschriebenen Prozeduren können also nicht unbedingt gefahrlos durchgeführt werden, da der Systemzustand unbekannt ist. Auch die Einbauorte der Komponenten und die Kabelführung im HV-Bordnetz können teilweise zu Sicherheitsrisiken bei einem Rettungseinsatzes führen. Beispielsweise ist die Verlegung der Kabel in den seitlichen Holmen problematisch, da dort im Falle von Personenbergungen oft Entlastungsschnitte gesetzt werden müssen. In Bezug auf die Rettungseinsätze muss das Personal durch Schulungen für den gefahrlosen Umgang mit verunfallten Elektrofahrzeugen ausgebildet werden. Kritisch ist hierbei, dass bei einem Rettungseinsatz nicht wie in der Werkstatt oder der Fertigung eine gesicherte Umgebung beziehungs-

weise ein definierter Zustand der Fahrzeuge vorliegt, wodurch immer ein Restrisiko für die Einsatzkräfte vor Ort besteht.

Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit werden die angesprochenen Sicherheitsprobleme in unserem Projekt analysiert. In einem ersten Abschnitt werden die bestehenden Zulassungsverordnungen und Normen untersucht und Änderungsvorschläge für die genannten Probleme erarbeitet. Zusätzlich wird der aktuelle Stand der Technik im Bezug auf die bereits existierenden Sicherheitssysteme in Hybrid- und Elektrofahrzeugen überprüft. Speziell im Bereich der elektrischen Energietechnik existieren bereits viele Sicherheitskonzepte zum Schutz von elektrischen Netzen. Anhand eines HiL-Aufbaus eines HV-Bordnetzes soll genauer untersucht werden, ob und wie sich diese Sicherheitssysteme in ein Fahrzeug integrieren lassen und wie zuverlässig diese in der Lage sind, möglichst alle Fehler zu detektieren und abzuschalten. Hierzu werden in den Aufbau Funktionen implementiert, um mögliche Fehler im HV-Bordnetz nachbilden zu können. Des Weiteren werden Möglichkeiten und Systeme untersucht, um den Rettungskräften den Zustand des Fahrzeuges nach einem Unfall anzuzeigen. Aktuelle HV-Bordnetz Komponenten lassen sich in diesen HiL-Aufbau integrieren, wodurch ihr Verhalten im Normalbetrieb und im Fehlerfall genauer analysiert werden kann. Ziel dieser experimentellen Untersuchungen wird sein, die elektrische Sicherheit der Fahrzeuge durch neue Konzepte zu verbessern.

Summary

The safety of electrically propelled vehicles is a sensitive issue, impacting on their full introduction to the market. All groups of people coming into contact with such vehicles, such

as the fire brigade, workshop personnel and the driver must be protected against injuries caused by an electric shock and fault arcs. The propulsion battery and the High Volt wiring harness in particular represent new safety hazards in electric vehicles compared to commercial vehicles with combustion engines. The current standards and type approval regulations for the new types of electrically propelled vehicles are currently insufficient for vehicles licensed for public streets. Therefore, as requested in the current German standardisation roadmap, these standards must be adapted to these new fields of application. In addition to the normative requirements, vehicle manufacturers have introduced several safety systems for the maintenance of electrical safety. The insulation resistance as well as the consistence of the whole electric propulsion circuit can be monitored by suitable measurement devices. Thus insulation faults, caused by an accident for example, can be detected reliably and a disconnection of the propulsion battery can be initialized. With regard to safety systems implemented in electric vehicles there is actually an urgent need for development. We are currently developing a test setup for experimental studies concerning safety systems which can be implemented in electric vehicles for improving electrical safety.

Anmerkungen

- 1) Pressemitteilung der CDU/CSU von 19. August 2009
- 2) Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität
- 3) Deutsche Normungsroadmap Elektromobilität
- 4) VDE-Studie Elektrofahrzeuge
- 5) Bender AMP
- 6) TYCO Electronics
- 7) BGB 8686

Literatur

– Lahl, U.: Zukünftige Antriebe für Automobile aus Sicht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 31.3.2009.

- Bundesregierung, Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2009.
- Bundesregierung, Nationale Plattform Elektromobilität, Deutsche Normungsroadmap Elektromobilität, 30.11.2010.
- Energietechnische Gesellschaft im VDE, VDE Studie Elektrofahrzeuge, April 2010.
- Valence INC., Testing Report BN 64159, Comparison of selected Lithium-Ion Battery Chemistries, 11.07.2007.
- Potdevin, H.: Isolationsüberwachung in Hochvolt-Bordnetzen von Elektro- und Hybridfahrzeugen, ATZ-elektronik 06/2009 Jahrgang 4.
- Dietrich, R.: Alternative Antriebe „Worauf es beim Einsatz von Relais in Hochvolt-Bordnetzen von Elektro- und Hybridautos ankommt.“, 08.03.2010, in: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/relais/articles/254109>
- Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, BGI/GUV-I 8686, Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen, Juni 2010.

Die Autoren

Holger Hirsch studierte Elektrotechnik an der Universität Dortmund und promovierte 1991 dort am Lehrstuhl Hochspannungstechnik und elektrische Anlagen zum Thema „Nichtkonventionelle Stromsensorik für Energieanlagen“. Danach war Hirsch Laborleiter bei einem großen EMV (kurz für: Elektromagnetische Verträglichkeit)-Dienstleister in Dortmund. 1998 Ruf an die Universität Dortmund (Arbeitsgebiet Theorie der EMV). 2003 erhielt er den Ruf an die Universität Duisburg-Essen; seither hat er den Lehrstuhl für Energietransport und -speicherung inne. Seine Forschungsgebiete sind: intelligente Netze, Hochspannungssysteme und EMV. Die in Forschungsprojekten gewonnenen Erkenntnisse fließen durch aktive Gremienarbeit in die internationale und nationale Normung ein.

Robert Hoffmann studierte elektrische Energietechnik sowie Elektro- und Informationstechnik an der Fachhochschule Düsseldorf. 2009 schloss er dort mit dem akademischen Grad Master of Science ab. Während des Masterstudiums war Hoffmann an der Fachhochschule Düsseldorf als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Lehre des Fachbereichs Elektrotechnik sowie in der Forschung im Hochschulinstitut für Produktentwicklung und Innovation (FMDauto) tätig. Seit 2009 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Duisburg-Essen im Fachgebiet Elektrische Anlagen und Netze der Fakultät Ingenieurwissenschaften.

Sebastian Jeschke, Jahrgang 1980, studierte Elektrotechnik an der Universität Duisburg-Essen. Seit 2010 ist er am Lehrstuhl Energietransport und -speicherung als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig, wo er sich im Rahmen des Projekts colognE-Mobil mit sicherheitstechnischen Fragestellungen im Bezug auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge beschäftigt.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73869
URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210205-115107-7

Alle Rechte vorbehalten.