

Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 92

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly rounded and have a white outline, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung

von

Robert Beyer
Dieter Blumenschein
Jürgen Bönninger
Jens Grohmann
Jens Lehmann
Dirk Meißner
Ronny Paulan
Sabine Richter
Marco Stiller
Jörg van Calker

FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH
Dresden

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 92

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.0534/2011

Ermittlung des Änderungsbedarfs auf Grund von Elektrofahrzeugen bei der periodisch technischen Überwachung

Fachbetreuung

Rainer Krautscheid

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-056-4

Bergisch Gladbach, November 2013

Kurzfassung – Abstract

Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung

Ziel des Projektes war es, bedingt durch die wachsende Anzahl der im Verkehr befindlichen elektrisch und hybrid-elektrisch betriebenen Fahrzeuge, notwendige Anpassungen der periodisch technischen Überwachung zu erarbeiten. Dazu wurden von verschiedenen Fahrzeugen die relevanten Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs identifiziert und deren Ausfallverhalten analysiert. Um die Degradationsauswirkungen einzelner Bauteile und Funktionen auf das gesamte System bestimmen zu können, hat die FSD ein Simulationsmodell erstellt. Die daraus ermittelten Ergebnisse waren Grundlage für die Bestimmung verkehrssicherheits- und umweltkritischer Bauteile sowie deren Funktionen. Diese Modellaussagen wurden mit Realversuchen an Fahrzeugen validiert. Zusätzlich konnten in einem Feldversuch 2.560 Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang untersucht werden.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich Änderungsvorschläge für die Untersuchungen und Vorgaben ableiten. Dafür ist für einen Großteil dieser Untersuchungen die Nutzung von Diagnosedaten eine geeignete Möglichkeit. Die 47. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften berücksichtigt bereits an vielen Stellen die neuen Antriebskonzepte. Von daher werden lediglich geringe Anpassungen in der StVZO für § 19 und den Beispielkatalog dazu, § 29, Anlage VIIIa, Anlage VIII d sowie die HU-Richtlinie vorgeschlagen. Für die Durchführung der Untersuchungspunkte zum HV-System ist die Entwicklung einer Hochvolt-Richtlinie empfehlenswert.

Einige wichtige Prüfverfahren lassen sich derzeit technisch noch nicht umsetzen. Dazu sind Änderungen der internationalen Bau- und Betriebsvorschriften notwendig. Diese werden bei der EU/UNECE anzuregen sein.

Es besteht über dieses Projekt hinaus weiterhin Forschungsbedarf, um sich intensiv mit diesen Fahrzeugen zu befassen und deren Weiterentwicklung zu beobachten, damit notwendige Auswirkungen auf die PTI rechtzeitig erkannt werden können.

Electric vehicles – influence on the periodic technical inspection

The goal of this project was to develop necessary adjustments to periodic technical inspections due to the growing number of electric and hybrid vehicles found on public streets. To that end, the relevant components of the electric drivetrain of various vehicles were identified and their failure performances analyzed. FSD created a simulation model to determine the degradation effects of individual components and functions on the system as a whole. The results that were collected formed the basis for the identification of traffic safety and environmentally critical components and their functions. These model predictions were validated with real vehicle tests. In addition, 2,560 vehicles with electric powertrains were examined in a field test.

From these results, change recommendations for inspections and standards could be derived. For a large part of these examinations, the use of diagnostic data is an appropriate method. Provision 47 of the amendments to the German road traffic regulations already takes into account the new drive concepts in many areas. Therefore, only small amendments are recommended to §19 and the associated example catalog, §29, Appendix VIIIa and Appendix VIII d of the StVZO, and to the general inspection guidelines. The development of high-voltage guidelines is recommended for carrying out the inspection points in a high-voltage system.

Currently, a few important inspection procedures technically cannot yet be implemented. Therefore, changes to the international building and operating regulations are required. This will need to be encouraged by the EU/UNECE.

There are additional research needs over and above this project to consider these vehicles intensively and observe their further development so that necessary impact on the periodic technical inspections can be detected in a timely manner.

Inhalt

Abkürzungen	6	3.2	Auswirkungen von Alterung, Verschleiß und Beschädigung auf die identifizierten Bauteile eines elektrischen Antriebsstrangs.	21
1 Einführung	7	3.2.1	Auswirkungen auf die Sensorik	21
1.1 Aufgabenstellung	7	3.2.2	Auswirkungen auf die Aktorik	28
1.2 Methodisches Vorgehen	7	3.2.3	Auswirkungen auf die Steuergeräte	34
1.3 Technisch-organisatorische Umsetzung	8	3.2.4	Auswirkungen auf sonstige Bauteile.	36
2 Identifikation der sicherheits- bzw. umweltrelevanten Bauteile und Funktionen bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen	8	3.3	Betrachtung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem mit softwaregestützten Modelluntersuchungen	41
2.1 Identifikation aller Komponenten eines elektrischen Antriebsstrangs. . . .	8	3.3.1	Vorbetrachtungen	41
2.2 Identifikation der Bauteile der Komponenten	9	3.3.2	Aufbau des Strukturmodells des elektrischen Antriebsstrangs.	42
2.2.1 Bauteile des Energiespeichers.	9	3.3.3	Umsetzung des Ausfallmodells mit Matlab/Simulink und Auswertung der Simulationsergebnisse	45
2.2.2 Bauteile der Elektromaschine.	12	3.3.4	Validierung des Ausfallmodells des elektrischen Antriebsstrangs.	46
2.2.3 Bauteile der Spannungswandler.	13	3.4	Allgemeine theoretische Betrachtung zur Manipulation der sicherheits- und umweltrelevanten Bauteile	51
2.2.4 Hochvoltkabel und -stecker	14	4 Ermittlung der möglichen Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf konventionelle Bauteile hinsichtlich der Verkehrssicherheit.	51	
2.2.5 Bauteile des Hochvoltklimakompressors	14	4.1	Beeinflusste Fahrzeugparameter	51
2.2.6 Bauteile der Hochvoltheizung.	14	4.2	Rückwirkungen der beeinflussten Fahrzeugparameter auf konventionelle Bauteile	52
2.2.7 Sonstige Bauteile	14	5 Einschätzung des Gefährdungspotenzials für die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs sowie für den Sachverständigen bzw. Prüflingenieur im Rahmen der Hauptuntersuchung	54	
2.2.8 Übersicht der Bauteile	15	5.1	Simulationsergebnisse	54
2.3 Integration der Identifizierungsergebnisse im Erhebungsbogen des Feldversuchs	17			
3 Ermittlung möglicher Auswirkungen von Alterung, Verschleiß, Beschädigung und Manipulation von Bauteilen sowie Funktionen des elektrischen Antriebsstrangs auf die Verkehrssicherheit und Umwelt.	17			
3.1 Allgemeine theoretische Betrachtungen zu Alterung, Verschleiß und Beschädigung elektrischer Bauelemente.	17			

5.2	Klassifizierung der sicherheits- bzw. umweltkritischen Bauteile nach Gefährdungspotenzial.	56
5.3	Ergebnisse aus dem Feldversuch	62
5.4	Auswirkungen von Manipulationen an ausgewählten sicherheits- und umweltrelevanten Bauteilen	65
6	Erarbeitung und Beschreibung allgemeiner und spezieller Anforderungen an die periodisch technische Überwachung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen	69
6.1	Ableitung von Untersuchungen und Vorgaben der sicherheits- und umweltkritischen Bauteile, selbstständigen technischen Einheiten sowie Systeme	69
6.2	Untersuchungen zu Auswirkungen auf die HU- und SP-Vorschriften	71
6.2.1	Änderungen im § 19 StVZO	71
6.2.2	Änderungen im § 29 StVZO und den Anlagen VIII bis VIIIId	72
6.2.3	Änderungen der HU- und SP-Richtlinien	73
6.3	Änderungsvorschläge über die PTI hinaus	75
7	Zusammenfassung und Ausblick	76
8	Literatur	77

Die Anlagen A bis C sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter: <http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
AC	Alternating Current, Wechselstrom
AP	Arbeitspaket
ASM	Asynchronmaschine
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BKV	Bremskraftverstärker
BMS	Batteriemanagementsystem
CAN	Controller Area Network, Netzwerk der Steuergeräte
DC	Direct Current, Gleichstrom
DSK	Doppelschichtkondensator
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ETA	Event Tree Analysis, Ereignisbaumanalyse
EV	Electric Vehicle, Elektrofahrzeug
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis, Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FSD	Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden
FTA	Failure Tree Analysis, Fehlerbaumanalyse
GSM	Gleichstrommaschine
HEV	Hybrid Electric Vehicle, hybridelektrisches Fahrzeug
HMI	Human-Machine Interface, Mensch-Maschine-Schnittstelle
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
HUA	HU-Adapter
HV	High Voltage, Hochvolt
LV	Low Voltage, Niedrigspannung
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MR	Magnetoresistiv
OBD	On-Board-Diagnose
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
SG	Steuergerät
SOC	State of Charge, Ladezustand der Batterie
SOH	State of Health, Alterungszustand der Batterie
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
VM	Verbrennungsmotor
WR	Wechselrichter, Inverter

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Die steigende Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antrieb stellt die periodisch technische Überwachung von Fahrzeugen vor neue Herausforderungen. Bei diesen Fahrzeugen stehen neben den klassischen sicherheitsrelevanten Funktionen und Bauteilen auch neue elektrische, chemische sowie funktionelle Sicherheitsaspekte im Fokus.

Im Zuge dieser Entwicklung hat die Fahrzeugsystemdaten GmbH (FSD), Dresden, von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) den Auftrag erhalten, die geltenden Anforderungen an die periodisch technische Überwachung im Hinblick auf Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang zu überprüfen. Ziel dieses Auftrags war es, zukünftig die sicherheitsrelevanten Mängel an diesen Fahrzeugen bei der periodisch technischen Überprüfung zu erkennen und somit das gewünschte Sicherheitsniveau über das gesamte Fahrzeugleben zu erhalten.

Es wurden Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang der Klassen L (mit Fremdkraftunterstützung bei Geschwindigkeiten über 25 km/h), der Klassen M und N untersucht. Der Schwerpunkt wurde aufgrund der Zulassungszahlen auf Untersuchungen an Fahrzeugen der Klassen M1 und L gelegt. Zusätzlich wurde die Einbeziehung fahrzeugseitiger OBD-Daten bei der PTI geprüft. Rückwirkungen des elektrischen Antriebsstrangs auf konventionelle Komponenten wie z. B. die Bremsanlage wurden ebenfalls analysiert.

1.2 Methodisches Vorgehen

In fünf Arbeitspaketen (AP1 bis AP5) sind die einzelnen Aufgabenschwerpunkte festgelegt worden.

Arbeitspaket 1 (AP1)

Zunächst wurde der elektrische Antriebsstrang technisch analysiert, um aufzuzeigen, inwieweit sicherheits- und umweltrelevante Funktionen und Bauteile zusätzlich oder abweichend zu den herkömmlichen Antrieben in Elektro- und Hybridfahrzeugen vorzufinden sind. Dazu zählen die Batterie mit einem eventuell vorhandenen Heiz-/Kühlsystem, die Leistungselektronik, der Elektromotor, die Leitungen, der Spannungswandler sowie die

Ladeeinheit und der Ladestecker. Nach der Ermittlung der Bauteile wurde der Erhebungsbogen für den Feldversuch zusammengestellt und an die teilnehmenden Überwachungsorganisationen verteilt.

Arbeitspaket 2 (AP2)

Anschließend sind mögliche Auswirkungen von Alterung, Verschleiß und Beschädigung sowie von Manipulationen relevanter Funktionen und Bauteile auf die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs sowie auf die Umweltaspekte untersucht worden. Dazu wurden auch Manipulationen an Fahrzeugen im Verkehr simuliert.

Arbeitspaket 3 (AP3)

Die Untersuchung der möglichen Auswirkungen auf die Funktionen und Bauteile die nicht zu den im ersten Schritt ermittelten, zusätzlichen bzw. abweichenden Funktionen und Bauteilen zählen, war Bestandteil von AP3. Dazu zählte z. B. der Einfluss der elektromotorischen Verzögerung durch Rekuperation von Bremsenergie auf die Reibbremsanlage.

Arbeitspaket 4 (AP4)

Anschließend ist das Gefährdungspotenzial für die Verkehrssicherheit und den Sachverständigen bzw. den Prüfer bei der PTI eingeschätzt worden. Neben diesen theoretischen Betrachtungen wurde der Feldversuch ausgewertet und gezielte Fahrzeugmanipulationen durchgeführt.

Arbeitspaket 5 (AP5)

Nach der Analyse sämtlicher Ergebnisse konnten die Anforderungen an eine Prüfung von Elektrofahrzeugen entwickelt werden.

Diese mündeten letztlich in einer Synopse mit bestehenden Regelungen zur periodisch technischen Überwachung, aus denen sich Vorschläge für neue, zu ergänzende bzw. zu ändernde Vorschriften ergaben. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Nutzung der Fahrzeugschnittstelle und die Aspekte zukünftiger Bremsenprüfungen auf der Basis von Referenzwerten gelegt. Abschließend wurden neue Anforderungen an die Aus- und Fortbildung der Sachverständigen und Prüferingenieure ebenso beschrieben wie die geänderten Anforderungen an Prüfstellen und Prüfwerkzeuge.

1.3 Technisch-organisatorische Umsetzung

Die Ergebnisse sind mit den Resultaten aus Untersuchungen an im Verkehr befindlichen Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang untermauert worden. Diese wurden im Prüflabor der FSD, Radeberg, und im Labor Elektrische Mobilität der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW Dresden) durchgeführt. Ebenso wurde in ausgewählten Prüfstellen der Überwachungsorganisationen (DEKRA, FSP, GTÜ, TÜV NORD, TÜV Rheinland, TÜV SÜD und TÜV Thüringen) sowie den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) ein Feldversuch durchgeführt, um die Erfahrung der Sachverständigen und Prüflingenieure aus der täglichen Praxis bei den Ergebnissen zu berücksichtigen. Hierzu füllten sie bei den Untersuchungen einen von der FSD entwickelten „Hochvolt-erhebungsbogen“ aus. Die Ergebnisse des Fragebogens wurden von der FSD ausgewertet und mit den umfangreichen Datenbanken der FSD verglichen, um die Aussagen zur Verkehrssicherheit und Fehleranfälligkeit zu untermauern.

Die HTW Dresden stellte das Equipment für die notwendigen Messungen zur Verfügung und übernahm die wissenschaftliche Begleitung sämtlicher Projektabschnitte.

2 Identifikation der sicherheits- bzw. umweltrelevanten Bauteile und Funktionen bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

2.1 Identifikation aller Komponenten eines elektrischen Antriebsstrangs

Der elektrische Antriebsstrang setzt sich aus Energiespeicher, Elektromaschine, Spannungswandler sowie Hochvoltkabel und -stecker zusammen (siehe Bild 1).

Als Energiespeicher für elektrische Energie stehen momentan Doppelschichtkondensatoren (DSK), Batterien und Schwungmassenspeicher zur Verfügung. Da lithiumbasierte Batterien stark verbreitet sind liegt bei den weiteren Betrachtungen der Schwerpunkt auf ihnen. Schwungmassenspeicher sind, momentan in der Erprobung und werden deshalb nicht näher untersucht.

Brennstoffzellenfahrzeuge befinden sich derzeit noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase und sind für den Endkunden bislang nicht marktabdeckend erhältlich. Laut der Zulassungsstatistik waren zum Jahresbeginn 2012 57 Fahrzeuge mit Antriebsart Brennstoffzelle/Wasserstoff zugelassen. Die zwei erhältlichen Modelle (Daimler W245 CH2 und Evobus 628) sind derzeit sehr gering verbreitet. Daher werden die Komponenten von Brennstoffzellenfahrzeugen bei den folgenden Betrachtungen nur kurz umrissen.

Als Elektromaschine werden Gleichstrom-, Asynchron- und Synchronmaschinen verwendet. Am weitesten verbreitet sind permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM). Sie weisen den besten Wirkungsgrad auf, und die Fortschritte bei der notwendigen Leistungselektronik zur Steuerung erlauben einen rentablen Einsatz.

Zur Steuerung des Elektromotors muss die Spannung des Energiespeichers verändert werden. Wird ein Gleichstrommotor eingesetzt, muss die Spannung lediglich variabel sein, zum Einsatz kommen dann Gleichspannungswandler. Bei einem Wechselstrommotor wird ein Wechselrichter benötigt. Die beim Antriebsstrang verwendeten Spannungswandler sind vorrangig bidirektional ausgeführt, damit beim Bremsen Energie rekupe-riert werden kann. Um die konventionellen Steuergeräte und Komponenten des herkömmlichen Bordnetzes zu versorgen, wird ein weiterer Spannungswandler in Form eines Gleichspannungswandlers verwendet.

Zum Verbinden der verschiedenen Komponenten sind Kabel und Stecker notwendig.

Bei den meisten Elektro- sowie Hybridfahrzeugen ist der Klimakompressor ebenfalls elektrifiziert und wird vom Hochvoltbordnetz gespeist.

Weiterhin wird in einigen Fahrzeugen ein elektrischer Zuheizung benötigt, der auch am Hochvoltbordnetz angeschlossen ist.

Eine Übersicht der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs gibt Bild 1, und diese werden im Folgenden weiter betrachtet.

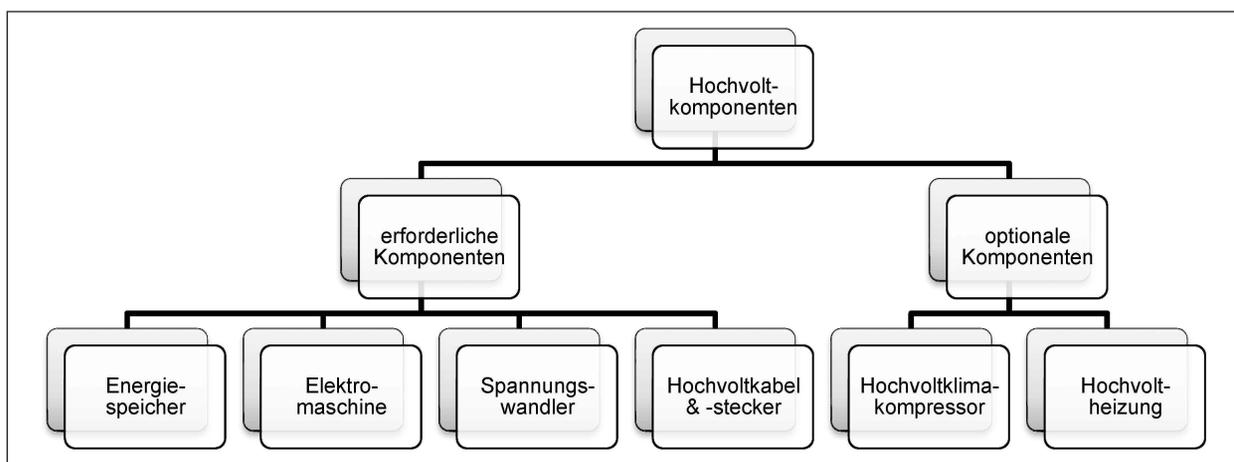


Bild 1: Übersicht der Hochvoltkomponenten

2.2 Identifikation der Bauteile der Komponenten

2.2.1 Bauteile des Energiespeichers

Batterie

Die Traktionsbatterie wandelt bei der Energiespeicherung elektrische in chemische Energie um. Bei Energieanforderung des Fahrzeugsystems wandelt sie die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie zurück.

Werden Batterien als Energiespeicher eingesetzt, besteht dieser aus mehreren einzelnen Zellen, die in Reihe geschaltet zu Modulen zusammengefasst sind. Mehrere dieser Module werden sowohl in Reihe (je nach gewünschter Spannung) als auch parallel (je nach gewünschtem Energiegehalt) geschaltet und bilden die Traktionsbatterie. Aktuell am verbreitetsten ist die auf Lithium basierte Batterietechnologie. Um eine Überlastung (z. B. thermisch, überladen, tiefenentladen) des Energiespeichers auszuschließen, müssen alle Zellen einzeln überwacht werden. Entsprechende Sensoren geben die Strom-, Spannungs- und Temperaturwerte der einzelnen Zellen an das Batteriesteuergerät weiter. Dort werden sie verarbeitet und bewertet. Anhand dieser Bewertung erfolgen die Ansteuerung des Kühlsystems, der Aufruf an das Motorsteuergerät zur Leistungsreduktion oder gegebenenfalls das Abschalten des Hochvoltsystems.

Batteriemanagementsystem (BMS)

Die Hauptaufgaben des Batteriemangement-systems sind der Schutz der einzelnen Batteriezellen vor dem Unter- oder Überschreiten der zulässi-

gen Betriebsspannungen (Entladeschlussspannung/Ladeschlussspannung) sowie das Detektieren von Fehlern. Im Weiteren sorgt das BMS für einen Potenzialausgleich der Zellen untereinander und ermittelt die „State of Charge“- (SOC) sowie die „State of Health“-Werte (SOH).

Sind bei in Reihe geschalteten Zellen zu große Unterschiede zwischen den einzelnen Zellspannungen, werden die Ladungen elektrisch ausgeglichen. Entweder werden dann Zellen mit zu hoher Spannung entladen, bis sie der Durchschnittsspannung entsprechen (passives Balancing), oder die Spannungsdifferenz wird genutzt, um schwächere Zellen aufzuladen (aktives Balancing).

Aufbau und Funktionsweise

Prinzipiell wird der Aufbau des BMS nach dem Balancingverfahren unterschieden. Die Anbindung an die verarbeitende Elektronik der Messdaten ist dabei überwiegend gleich realisiert. Bild 2 zeigt das aktive Balancing.

Das Mess- und Steuermodul ist in der Regel ein separater Schaltkreis. Verbunden mit dem Mikrocontroller, übermittelt es die Spannungswerte den einzelnen Zellen und führt die Ansteuerung der Lade- und Entlade-MOSFET aus. Der Messeingang für die jeweilige Zelle der Batterie ist mit einem Messwiderstand zur Strombegrenzung sowie einem Kondensator zur Spannungsstabilisierung beschaltet. Auch die Ansteuerleitungen der Schalter zum Beschalten des Transformators, der die Energie von einer Zelle auf alle umsetzt oder die Spannung von allen Zellen zum Nachladen von einer bestimmten Zelle benutzt, sind mit Vorwiderständen und Entstörkondensatoren ausgestattet.

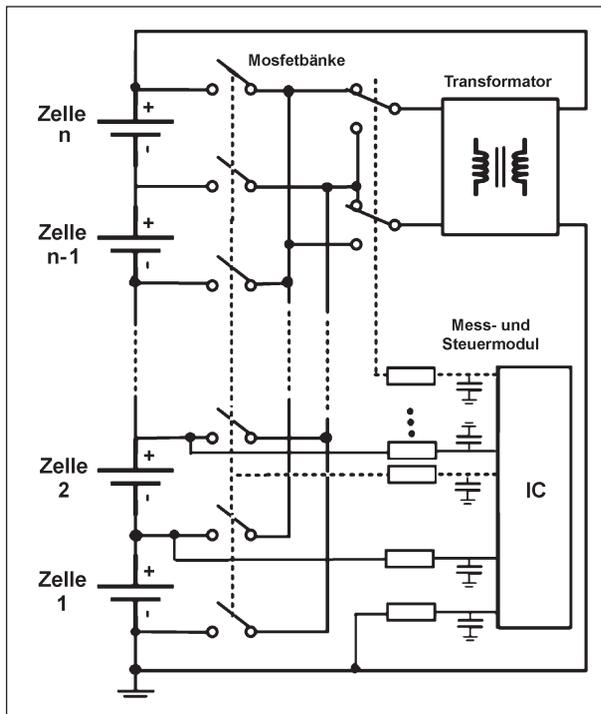


Bild 2: Prinzipschaltung des aktiven Balancings (HÜBN 2013)

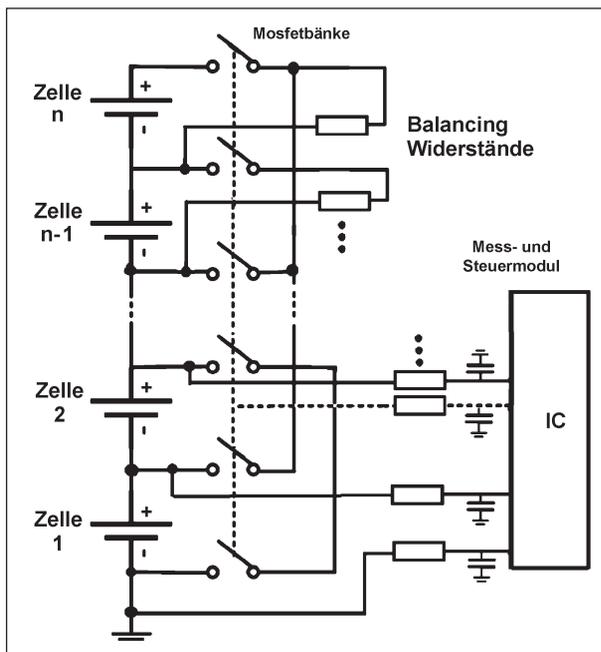


Bild 3: Prinzipschaltung des passiven Balancings (HÜBN 2013)

In Bild 3 ist das passive Balancing abgebildet. Dieses Verfahren ist weniger aufwändig und nimmt mehr Energie auf als das aktive Balancing. Die Ansteuerelektronik entlädt die einzelne Batteriezelle, sobald ein Spannungsschwellwert überschritten wird. Das geschieht durch die Beschaltung der Zellen über einen MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) zu einem

parallelen Widerstand. Diese Balancingwiderstände müssen für eine höhere Leistung von ca. 2 Watt dimensioniert sein. Das Messen der Zellpotenziale erfolgt wieder durch Vorwiderstände am Messmodul. Alternativ kann diese Aufgabe auch der Mikrocontroller übernehmen, wobei dieser mit der Aufgabe der Kommunikation und Datenaufbereitung fast immer ausgelastet ist.

Das Mess- und Steuermodul des BMS zeichnet außer den Spannungen zusätzlich den Strom des Batteriesystems auf und errechnet daraus den Ladezustand (SOC). Für die Altersbestimmung des Akkus ist die Zyklierung maßgebend. Daraus kann der Alterungszustand (SOH) abgeleitet werden.

Batteriekühlung

Die Batteriekühlung ist für die Regelung der Batterietemperatur zuständig. Die Kühlung bzw. ggf. auch Heizung des Batteriesystems ist den dort verbauten Akkumulator-Zellen geschuldet, die meist auf der Basis von Lithium-Verbindungen (Li-Ion, Li-Polymer u. a.) hergestellt sind. Bei zu geringen Temperaturen ist die Leistungsentnahme aus den Akkumulatoren eingeschränkt, bei zu hohen Temperaturen verringert sich die Lebensdauer bzw. Zyklenfestigkeit der Zellen. Im Extremfall kann eine thermische Überlastung zur Entzündung der Zellen und in der Konsequenz zur kompletten Zerstörung des Fahrzeuges führen.

Aufbau und Funktionsweise

Als Kühlsysteme werden Luft- und Flüssigkeitskühlung eingesetzt. Batterielüfter sorgen im Luftkühlsystem für den Luftstrom, der durch Kanäle die Batterie umspült. Lüftungsgitter schützen dabei die Kanäle vor einer Blockierung durch Fremdmaterial. Ein Steuergerät regelt den Luftstrom auf Grundlage der Auswertung von Temperatursensoren an der Batterie selbst und im Ansaugluftkanal. Für eine Flüssigkeitskühlung sind Kühlmittelschläuche, Kühlmitteltemperatursensoren, eine Kühlmittelpumpe sowie eine Druckregeleinheit notwendig. Des Weiteren kann die Klimaanlage auch an das Kühlsystem der Batterien angeschlossen sein.

Batterie Hauptschalter, Sicherheitslinienunterbrecher und Hochvolt-Schützschaltung

Die Aufgabe dieser drei Elemente besteht in der Trennung der Traktionsbatterie vom HV-Bordnetz.

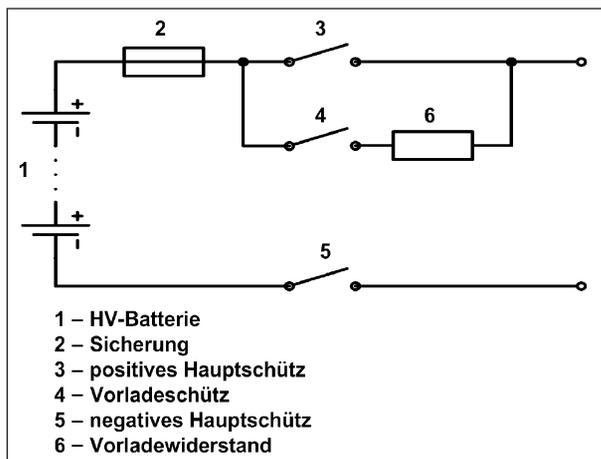


Bild 4: Prinzipschaltbild der Batterieschützschaltung

Die HV-Schützschaltung regelt den Kontakt zwischen HV-Batterie und HV-Bordnetz. Somit werden neben dem Sicherheitsaspekt vor allem auch Ruhestrome im ausgeschalteten Zustand vermieden.

Aufbau und Funktionsweise

Um das Hochvoltbordnetz im Servicefall abschalten zu können, ist in der Batterie ein Batteriehaupschalter verbaut. Er ist in der Regel so verschaltet, dass er die Hälfte der Batteriemodule trennt und somit maximal die halbe Nennspannung abgegriffen werden kann. Um das Entfernen von Verkleidungen beziehungsweise Verkleidungsteilen des Hochvoltsystems detektieren zu können, wird oft eine Sicherheitslinie verbaut. Wird diese unterbrochen, fallen die ebenfalls in das Batteriegehäuse integrierten Hochvoltschütze (siehe Bild 4) ab, und das Hochvoltbordnetz ist spannungsfrei.

Bei Aktivierung des Fahrzeuges (durch Drehen des Zündschlüssels) wird zuerst das negative Hauptschütz geschlossen und danach das Vorladeschütz. Es schließt den Stromkreis über einen Vorladewiderstand und dient dem Aufladen der Bordnetzkapazitäten. Der Vorladewiderstand begrenzt hierbei den Strom. Hat die Zwischenkreisspannung an den Klemmen einen Schwellspannungswert überschritten, wird das positive Hauptschütz geschlossen und das Vorladeschütz wieder geöffnet. Das Fahrzeug ist nun im fahrbereiten Zustand.

Isolationswächter

Um die in der ECE-R 100 vorgeschriebene galvanische Entkopplung des Hochvoltbordnetzes vom 12-V-Bordnetz zu überwachen, werden Isolationswächter eingesetzt. Das Hochvoltbordnetz von

Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist ein isoliertes, also nicht geerdetes Stromnetz (ein so genanntes IT-Netz). Der Isolationswächter hat die Aufgabe, den Isolationswiderstand der stromführenden Leiter gegen Bezugserde (Fahrzeugmasse) zu messen und ggf. die Energieversorgung im Fehlerfall abzuschalten. Ein erster Isolationsfehler ist unkritisch, da der Stromkreis nicht geschlossen wird. Der Fehler wird vom Isolationswächter detektiert, angezeigt und je nach System wird die Energieversorgung unterbrochen. Erst bei Auftreten eines zweiten Isolationsfehlers an einem anderen Leiter kann es zum Körperschluss und somit zur Gefahr für Personen und Sachmittel kommen. Der Isolationswächter schaltet dann umgehend die Energieversorgung ab.

Aufbau und Funktionsweise

Das Messprinzip des Isolationswächters basiert auf einer Messspannung, die zwischen den Leitern des Hochvoltbordnetzes und dem 12-V-Bordnetz angelegt wird. Bei einem Isolationsfehler wird der Messkreis kurzgeschlossen, und über den Messwiderstand des Isolationswächters kann eine dem Isolationswiderstand proportionale Spannung gemessen werden. Netzurückwirkungen, wie sie zum Beispiel durch den Betrieb von Wechselrichtern entstehen, verfälschen das Messsignal. Um das auszugleichen, wird die Messspannung durch den Einsatz eines Mikrocontrollers getaktet. Dadurch ist es möglich, mit Hilfe softwaregestützter Auswertung des Signals zwischen dem eigentlichen Messsignal und den Störsignalen zu differenzieren (BEND 2013).

Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist dafür verantwortlich, aus einem Brennstoff – meist Wasserstoff – in Reaktion mit einem Oxidationsmittel elektrische Energie zu erzeugen. Die Zelle selbst ist kein Energiespeicher im eigentlichen Sinn. Da die Einheit aus Tank und Brennstoffzelle aber die Aufgaben eines Energiespeichers erfüllt, werden die Komponenten in diesem Kapitel betrachtet.

Aufbau und Funktionsweise

Der Brennstoffzellenantrieb bildet ein modulares Antriebskonzept. Dabei werden Brennstoffzellen für die Energieumwandlung eingesetzt. Folgende Komponenten sind im Fahrzeug notwendig:

- Kraftstofftanks für energiehaltige Substanzen (Je nach Art der Brennstoffzelle sind dies Hoch-/Niederdrucktanks für z. B. H_2 oder CH_4O . Diese Tanks müssen gegen Überdruckbeanspruchung, thermische, mechanische und chemische Beanspruchung gesichert sein),
- Pufferspeicher (z. B. DSK oder Batterie),
- Reformier zur Reinigung und Umwandlung von H_2 ,
- Luftmodul mit Verdichter zur Frischlufteinblausung in die Brennstoffzelle,
- Brennstoffzellenstack,
- Peripheriesystem mit Tanküberwachung und Sicherheitseinrichtungen (z. B. Druck- und Temperatursensoren).

Um die Brennstoffzelle dauerhaft im Wirkungsgradmaximum zu betreiben und kurzzeitige Leistungsanforderungen auszugleichen, werden Pufferspeicher eingesetzt. Für diese Module sind alle bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen getroffenen Aussagen zu deren Komponenten gleichermaßen gültig. Richtlinienentwürfe für die speziellen Komponenten der Brennstoffzellenfahrzeuge können sich an den Entwürfen des European Integrated Hydrogen Project orientieren (EIHP 2013).

Zusatzbatterie

Auch bei Vorhandensein einer HV-Batterie enthalten die entsprechenden Fahrzeuge außerdem eine Zusatzbatterie. Diese dient der Versorgung der Steuersysteme vor allem vor dem Zuschalten des HV-Energiernetzes und zur Pufferung von Spannungseinbrüchen vom 12-V-Bordnetz durch Verbraucher, wie z. B. Scheibenwischer, Lichtanlage und Infotainmentsystem.

Aufbau und Funktionsweise

Die Zusatzbatterie ist wie im konventionellen Fahrzeug überwiegend eine Bleisäure-Batterie, die chemische Energie in elektrische Energie umwandelt. Diese Batterie wird in der Regel ebenfalls von einem Temperatursensor überwacht.

Zwischenkreise

Ihre Aufgaben sind die Pufferung von Energie, die Stabilisierung der Spannungslage und die Filterung

von Spannungsspitzen. Daher sind sie vor allem zwischen dem Energiespeicher und den Spannungswandlern bzw. zwischen dem Generator und dem Energiespeicher zu finden.

Aufbau und Funktionsweise

Zwischenkreise sind im Hochvoltbordnetz meist mit Zwischenkreiskondensatoren bestückt. Wie vorher beschrieben, wird beim Einschaltvorgang des Fahrzeugs die Batteriespannung zuerst über einen Vorladewiderstand dem HV-Bordnetz zugeschaltet. Auf diese Weise werden die Kapazitäten, vornehmlich die der Zwischenkreise, mit einem begrenzten Strom aufgeladen. Nachdem der Zwischenkreis einen Schwellwert erreicht hat, wird der Vorladewiderstand wieder getrennt und der Kontakt zur HV-Batterie direkt geschlossen.

2.2.2 Bauteile der Elektromaschine

Die Elektromaschine dient der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie und ist damit für den Vortrieb in elektrisch und hybrid-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen zuständig. Im motorischen Betrieb wandelt die Elektromaschine die elektrische Energie, die aus dem Energiespeicher kommt, in Bewegungsenergie um. Im generatorischen Betrieb wandelt sie die kinetische Energie des Fahrzeuges in elektrische Energie um, die in den Energiespeicher zurückgespeist wird. Dabei wird das Fahrzeug abgebremst. Dieser Vorgang wird Rekuperation genannt. In manchen Fahrzeugen gibt es auch eine separate Elektromaschine, welche — angetrieben durch einen Verbrennungsmotor — nur als Generator fungiert.

Aufbau und Funktionsweise

Eine Elektromaschine besteht aus zwei Hauptkomponenten: dem Stator und dem Rotor. Je nach Art sind entweder beide mit Spulen oder der Stator mit Spulen und der Rotor mit Permanentmagneten bestückt. Beide Teile erzeugen Magnetfelder, die in Wechselwirkung miteinander für die Drehbewegung des Rotors verantwortlich sind (motorischer Betrieb). Im generatorischen Betrieb induziert das drehende Magnetfeld des Rotors in die Spulen des Stators eine Spannung, welche für die Wiederaufladung des Energiespeichers genutzt wird.

Für den Betrieb der Elektromaschine ist es erforderlich, den aufgenommenen Strom zu sensieren. Um ein Überhitzen zu verhindern, ist eine Kühlung

notwendig. Diese kann als Flüssigkeits- oder als Luftkühlung ausgeführt sein. Bei Einsatz einer Luftkühlung sind ebenso wie bei den Energiespeichern Luftkanäle sowie ein Lüfter inklusive Steuergerät erforderlich. Bei Flüssigkeitskühlung müssen Kühlschläuche, Kühler sowie eine Kühlmittelpumpe vorhanden sein. Um die Kühlung regeln sowie das maximale Motormoment ermitteln zu können und den Elektromotor somit vorm Überhitzen zu schützen, ist es notwendig, die Motortemperatur zu erfassen.

Der Einsatz eines Rotorpositionssensors ist abhängig von der verwendeten Elektromaschine. Wird eine Gleichstrommaschine (GSM) verwendet, muss zwischen Gleichstrommaschinen mit mechanischer und elektrischer Kommutierung unterschieden werden. Beim Einsatz einer GSM mit mechanischer Kommutierung sind lediglich der Strom und die Spannung zur Regelung erforderlich. Aufgrund der geringen Robustheit, des hohen Geräuschpegels und des Wartungsaufwands wird diese Motorenart jedoch nur noch sehr selten eingesetzt. Bei der GSM mit elektrischer Kommutierung (auch bürstenlose Gleichstrommaschine oder brushless-dc-motor) wird die Wicklung im Stator (Ständer) eingebracht, und auf dem Rotor (Läufer) werden die Permanentmagnete verankert. Somit müssen die Statorwicklungen in Abhängigkeit der Rotorposition bestromt werden. Dies macht den Einsatz von Rotorpositionssensoren bei dieser Elektromaschine erforderlich.

Vorwiegend kommen in aktuell auf dem Markt befindlichen elektrifizierten Fahrzeugen Drehstrommotoren zum Einsatz. Hier sind vor allem die permanentmagneterregten Synchronmaschinen zu nennen. Diese haben eine sehr gute Leistungsdichte und einen hervorragenden Wirkungsgrad. Allerdings benötigen sie eine dreiphasige Wechselspannung, die das Drehfeld für den mit den Permanentmagneten bestückten Rotor in den Spulen des Stators erzeugt. Hierfür ist ein Wechselrichter notwendig, der diese Wechselspannung aus der Gleichspannung des Energiespeichers des Fahrzeuges generiert. Beim Einsatz von Drehstrommaschinen wird immer ein Rotorpositionssensor eingesetzt, damit die Phasenlage der Wechselspannung an die Rotation der Motorwelle angepasst werden kann.

2.2.3 Bauteile der Spannungswandler

Ein Spannungswandler hat generell die Aufgabe, die Spannung an seiner Eingangsseite an die Erfordernisse seiner Ausgangsseite — vorgegeben durch die Verbraucher — anzupassen. Dabei gibt

es die Varianten der Umwandlung von einer Gleich- in eine andere Gleichspannung anderer Höhe (DC-DC-Wandler oder Gleichspannungswandler), die Umwandlung von einer Wechsel- in eine Gleichspannung (AC-DC-Wandler, Gleichrichter) oder die Umwandlung von einer Gleichspannung in eine Wechselspannung (DC-AC-Wandler, Wechselrichter, Inverter). Im elektrisch oder hybridelektrisch betriebenen Fahrzeug ergeben sich folgende Aufgaben für Spannungswandler:

- Ein Gleichspannungswandler wandelt Gleichspannung aus dem Energiespeicher in der Höhe ihrer Spannungslage – im Falle einer GSM als Antriebsmaschine.
- Ein Wechselrichter wandelt Gleichspannung aus dem Energiespeicher in eine dreiphasige Wechselspannung mit einem Wechselrichter – wenn die Drehstrommaschine als Antriebsmaschine arbeitet.
- Gleichrichter und/oder Gleichspannungswandler laden die Hochvoltbatterie aus einer externen Spannungsquelle (AC bzw. DC) auf.
- Gleichspannungswandler erzeugen aus der HV-Batterie eine Spannung zur Versorgung der Verbraucher im 12-V-Bordnetz (Radio, Licht, Scheibenwischer usw.).

Aufbau und Funktionsweise

Ein Spannungswandler besteht immer aus einem Eingangs- und einem Ausgangsfilter sowie mehreren Leistungshalbleitern. Sollen Gleichspannungen gewandelt werden, sind weiterhin eine Spule und/oder ein Transformator notwendig. Zusätzlich benötigen Spannungswandler eine Regelung, die meist in einem externen Steuergerät untergebracht ist. Um die Spannungswandler vor dem Überhitzen zu schützen, werden auch hier Temperatursensoren eingesetzt. Eingebaute Stromsensoren erkennen die Überlastung. Bei einigen Fahrzeugen (z. B. Toyota Prius III) werden zusätzlich Drucksensoren verbaut.

Soll das Fahrzeug am Drehstromnetz geladen werden, ist hierfür ein Gleichrichter notwendig, der aus der Wechselspannung eine Gleichspannung erzeugt. Die Anpassung der erzeugten Gleichspannung übernimmt ein Gleichspannungswandler.

Da in Spannungswandlern große Ströme geschaltet werden, kommt es zu einer großen Verlustleistung an den Bauelementen. Um diese bei geringem

Platzbedarf abführen zu können, sind die Spannungswandler flüssigkeitsgekühlt ausgeführt.

2.2.4 Hochvoltkabel und -stecker

Die Aufgabe der Hochvoltkabel und -stecker besteht in der Übertragung der elektrischen Leistung von der Quelle zum Verbraucher. Zum externen Laden des Energiespeichers bildet der Ladeanschluss die Schnittstelle zwischen der externen Energiequelle (meist das konventionelle 230-V-Hausnetz) und dem Hochvoltbordnetz.

Aufbau und Funktionsweise

Den Kontakt zwischen externer Energiequelle und dem Hochvoltbordnetz ermöglicht ein Ladekabel, dessen Kontaktstatus elektronisch erfasst wird. Ein separates Steuergerät ist für die Überwachung und Steuerung des Batterie-Ladevorganges zuständig. Zur Absicherung des Spannungsnetzes im Fahrzeug dienen Sicherungen, die sowohl vor Überstrom als auch Fehlerstrom schützen. Die Hochvoltkabel sind generell an ihrer orangen Farbe erkennbar (sofern ECE-R 100 konform).

2.2.5 Bauteile des Hochvoltklimakompressors

Der Hochvoltklimakompressor wird über den Energiespeicher des Elektro- oder Hybridfahrzeuges gespeist und ist für die Kühlung des Innenraums des Fahrzeuges sowie teilweise auch des HV-Energiespeichers verantwortlich.

Aufbau und Funktionsweise

Zu dieser Funktionseinheit gehört der Kompressor, der das Spezialkühlmittel (Kühlmittel mit bestimmten Eigenschaften für HV-Fahrzeuge) verdichtet. Angetrieben wird er von einem Elektromotor, welcher mittels eines Spannungswandlers mit Energie aus dem HV-Bordnetz versorgt wird. Ein Kühlerlüfter sorgt für einen verbesserten Wärmeaustausch zwischen Umgebung und Kühlmittel. Die Steuerung des Kühlkreislaufes regelt ein externes Steuergerät. Es erhält über Temperatursensoren die für die Steuerung nötigen Informationen.

2.2.6 Bauteile der Hochvoltheizung

Die Hochvoltheizung ist für die Erwärmung des Innenraumes im Fahrzeug zuständig. In manchen Fahrzeugausführungen wird sie auch dazu verwen-

det, um die HV-Batterie bei zu tiefen Außentemperaturen vorzukonditionieren.

Aufbau und Funktionsweise

Ein Heizaggregat erhitzt das Kühlmittel, das durch die Kühlwasserpumpe an den Wärmetauscher geleitet wird. Dieser überträgt die Wärme aus dem Heizkreislauf an die Luft, die in den Innenraum geleitet wird. Temperatursensoren nehmen die Temperaturen der einzelnen Positionen im Heizkreislauf auf und geben sie an das Steuergerät weiter. Dieses ist für die Steuerung der Heizung, Kühlung der Batterie und des Innenraumes verantwortlich.

2.2.7 Sonstige Bauteile

Regeneratives Bremssystem

Das Bremssystem in elektrischen und hybridelektrischen Fahrzeugen hat, wie auch bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen, die Aufgabe, das Fahrzeug bzw. die einzelnen Räder abzubremsen. Hierfür wird jedoch nicht nur die Reibbremse verwendet, sondern bei leichten Bremsungen auch die Verzögerungswirkung der Antriebsmaschine im generatorischen Betrieb. Die hierbei erzeugte elektrische Energie kann in den Energiespeicher zurückgespeist werden. Dieser Vorgang wird als Rekupe-ration bezeichnet.

Aufbau und Funktionsweise

Bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang kommen neben konventionell hydraulischen auch elektrohydraulische Bremssysteme zum Einsatz.

Beim Einsatz eines konventionell hydraulischen Bremssystems wird beim Betätigen des Bremspedals sofort ein hydraulischer Druck in das Bremssystem eingespeist. Das Erkennen des Verzögerungswunsches des Fahrers übernimmt der Bremspedalsensor. Abhängig vom Fahrzeugkonzept wird der Fahrerverzögerungswunsch durch die Reibbremse und das rekuperative Bremsen oder nur durch die Reibbremse umgesetzt. Bei Letzterem wird die Rekupe-ration über eine andere Betätigungseinrichtung (meist Gaspedal) gesteuert. Im Falle einer Bremsung über die Reibbremse verstärkt der Bremskraftverstärker mit Hilfe einer Unterdruckpumpe den Bremsdruck auf der Sekundärseite des Hydraulikkreises. Den Membranweg und den Unterdruck im Bremskraftverstärker erfassen Sensoren.

Wird hingegen ein elektrohydraulisches Bremssystem eingesetzt, ist der hydraulische Druck des Bremspedals vom hydraulischen Kreis der Radbremszylinder entkoppelt. Bei leichten Bremsungen wird der Antriebsmotor in den Generatorbetrieb versetzt, wodurch die Antriebsachse abgebremst und Energie zurück in die Batterie gespeist wird (Rekuperation). Das Verhalten des Bremspedals bildet der Pedalkraftsimulator nach, um für den Fahrer die Haptik einer konventionellen Bremse aufrechtzuerhalten. Reicht die Verzögerung der rekuperativen Abbremsung nicht aus, um den Fahrerverzögerungswunsch umzusetzen, wird die Reibbremse hinzugenommen. Das Hydroaggregat stellt den nötigen Hydraulikdruck für das Bremssystem zur Verfügung, der ebenfalls über Sensoren gemessen wird.

Weitere Sensoren für die Steuerung des Bremssystems und der Fahrdynamikregelung sind der Fahrdynamiksensor, die Raddrehzahlsensoren, der Lenkradwinkelsensor und der Fahrpedalsensor. Die Steuerung im Bremssystem übernimmt ein eigenes Bremsensteuergerät.

Kompressoraggregat

Das Kompressoraggregat ist primär in Kraftomnibussen und Nutzfahrzeugen über 3,5 t eingebaut. Es ist verantwortlich für die Bereitstellung der Druckluft für verschiedene Anwendungen in pneumatischen Systemen wie etwa der Fremdkraftbremsanlage, der pneumatischen Höhenanpassung des Fahrwerkes bei Kraftomnibussen oder den Öffnungsmechanismus der Türen.

Aufbau und Funktionsweise

Ein Druckluftkompressor verdichtet Umgebungsluft, die in einem pneumatischen Tank zwischengespeichert wird. Im Anwendungsfall wird sie über Druckluftleitungen an die entsprechenden Aktoren weitergeleitet.

Sicherheitstechnische Bauteile

Andere Komponenten dienen der Sicherheit der Fahrzeuginsassen. Dies betrifft vor allem die Unfalldetektion inklusive dem Ergreifen von Verletzungsvermeidenden Maßnahmen. Außerdem soll sichergestellt werden, dass im Falle eines Unfalls das Fahrzeug aus dem betriebsbereiten in den sicheren Zustand wechselt.

Aufbau und Funktionsweise

Betroffene Bauteile sind unter anderem die Airbagsensoren in Verbindung mit dem zugehörigen Steuergerät. Diese steuern nicht nur das Auslösen des Airbags, sondern auch die Batterieunterbrechung durch die pyrotechnische Sicherung. In diesem Fall wird die Hauptstromzufuhr vom 12-V- sowie Hochvolt-Bordnetz getrennt, und das Fahrzeug wechselt in einen sicheren Zustand. Die Fahreranwesenheit erfassen Gurtschloss- und Türkontaktschalter.

Bauteile der Bedienoberfläche

Für die Interaktion mit dem Fahrer stehen verschiedene Komponenten zur Verfügung. Sie dienen der Informationsweitergabe an den Fahrer wie Fahrgeschwindigkeit, Fehlerzustände, Betriebsmodi sowie der Eingabe seitens des Fahrers bezüglich Fahrzeugzustand und Fahrmodus. Wichtige Elemente der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle sind das Kombiinstrument mit Kontroll- und Warnleuchten sowie der Start- bzw. Power-Schalter oder das Zündschloss, um das Fahrzeug in den fahrbereiten Zustand zu versetzen.

2.2.8 Übersicht der Bauteile

In Tabelle 1 sind die identifizierten Bauteile der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs zusammengefasst.

Hochvolt-komponenten		Bauteile
Energiespeicher	Sensoren	Stromsensoren
		Spannungssensoren
		Temperatursensoren
	Aktoren	Hochvoltschütze
		Batterie Hauptschalter
		Sicherheitslinienunterbrecher
		Kühlmittelpumpe
		Batterielüfter
	Steuergeräte	Batteriemanagementsystem (BMS)
		SG Klimaaggregat
		SG Batterielüfter

Tab. 1: Übersicht der Bauteile der Hochvoltkomponenten

Hochvolt-komponenten		Bauteile
Energiespeicher (Fortsetzung)	Sonstiges	Batteriezellen
		Doppelschichtkondensator
		Brennstoffzelle
		Lüftungsgitter
		Lüftungsschächte
		Kühlmittelschläuche
		Druckregel­einheit
		Klimaaggregat
		Isolationswächter
		Zusatz­batterie
Elektromaschine	Sensoren	Stromsensor
		Rotorpositionssensor
		Temperatursensoren
	Aktoren	Motorlüfter
Steuergeräte	SG Motorlüfter	
	SG Motorkühler	
Sonstiges	Kühlmittelschläuche	
Spannungs-wandler	Aktoren	Gleichrichter
		Wechselrichter
		Gleichspannungswandler
		Sicherheitslinien- unterbrecher
	Sensoren	Stromsensoren
		Temperatursensoren
		Spannungssensoren
		Drucksensoren
	Steuergeräte	SG Gleichrichter (Batterieladung)
		SG Wechselrichter
SG Gleichspannungs- wandler		
Sonstiges	Zwischenkreis- kondensatoren	
	Isolationswächter	
Hochvoltkabel und -stecker	Aktoren	Sicherheitslinien- unterbrecher
	Sonstiges	Ladekabel
		Hochvoltkabel
		Ladeanschluss
		Sicherungen
Sicherheitslinie		

Tab. 1: Fortsetzung

Hochvolt-komponenten		Bauteile
Hochvoltklima-kompressor	Aktoren	Klimakompressor
		Kühlerlüfter
		Spannungswandler
	Sensoren	Temperatursensoren
Steuergeräte	SG Klimaaggregat	
Hochvoltheizung	Aktoren	Heizaggregat
		Kühlwasserpumpe
	Sensoren	Temperatursensoren
	Steuergerät	SG Heizung
Sonstiges	Wärmetauscher	
Regenerative Bremse	Aktoren	Bremskraftsimulator
		Bremskraftverstärker inkl. Unterdruckpumpe
		Hydroaggregat
		Raddrehzahlsensoren
	Sensoren	Fahrdynamiksensor
		Bremsdrucksensor
		Membranwegsensoren
		Unterdrucksensoren
		Fahrpedalsensoren
		Bremspedalsensoren
Steuergeräte	SG Bremse	
Sonstige Bauteile	Aktoren	Kompressoraggregat (für Druckluft)
		Taster für rein elektrische Antriebsweise
		Feststellbremsschalter
	Sensoren	Batterieunterbrecher/pyro- technische Sicherung
		Start-Schalter/Power- Schalter
		Türkontaktschalter
Steuergeräte	Airbagsensoren	
Sonstiges	SG Airbag	
Sonstiges	Kombiinstrument	

Tab. 1: Fortsetzung

2.3 Integration der Identifizierungsergebnisse im Erhebungsbogen des Feldversuchs

Um die Annahmen zu den Fehlerbildern der Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang zu überprüfen, wurde ein Feldversuch durchgeführt. Da nur 0,1 % aller angemeldeten Fahrzeuge über einen elektrischen Antriebsstrang verfügt, wurden für ein repräsentatives Ergebnis in Abstimmung mit der BASt gezielt Fahrzeughalter von Elektro- und Hybridfahrzeugen von dem Kraftfahrtbundesamt (KBA) angeschrieben und dazu aufgefordert, an der Studie teilzunehmen. Etwa 12.000 Fahrzeughalter meldeten sich für den Feldversuch. Die notwendigen Daten wurden in einer Datenbank erfasst und automatisiert den teilnehmenden Überwachungsorganisationen zur Abarbeitung zugewiesen. Darüber hinaus haben die teilnehmenden Überwachungsorganisationen durch eigene Werbung für das Projekt weitere Fahrzeuge untersucht und die Ergebnisse der FSD zur Verfügung gestellt.

Im Feldversuch konnte sich der Fahrzeughalter zwischen einer kompletten Hauptuntersuchung gemäß § 29 StVZO oder einer nach Art und Umfang einer HU entsprechenden Untersuchung ohne Beurteilung des Emissionsverhaltens entscheiden. Zur Dokumentation der Untersuchungsergebnisse haben die Sachverständigen bzw. Prüffingenieure einen „Hochvolt-Erhebungsbogen“ ausgefüllt. Dieser beinhaltete folgende Fragenkomplexe:

- Angaben zur prüfenden Person, Prüfungsort sowie Fahrzeug,
- Bremswerte und Notwendigkeit einer Bremsenconditionierung, um diese zu erreichen,
- Auffälligkeiten während der Prüfungsfahrt wie Aufleuchten von Kontroll- und Warnleuchten, Funktionsfähigkeit aller Betätigungseinrichtungen, Innenraumklimatisierung sowie Bremsenergierekuperation,
- Prüfung der HV-Komponenten und ihrer Peripherie auf Vorhandensein, Kennzeichnung, Beschädigung.
- Bei Fahrzeugen der Klasse L wurde zudem um Auskünfte nach Ermüdungserscheinungen am Rahmen sowie intakten Schwingen- und Lenkopyflager gebeten.

Der komplette „Hochvolt-Erhebungsbogen“ kann im Anhang A eingesehen werden. Der Feldversuch sollte vom 01.07.2012 bis zum 31.01.2013 durchgeführt werden. Aufgrund der unerwartet hohen Rückmeldungsquote von Haltern und bedingt durch Verzögerungen beim Vertragsabschluss zum Versand des Halteranschreibens wurde die Dauer bis zum 31.03.2013 verlängert. Damit war es möglich, eine repräsentative Menge an Fahrzeugen zu untersuchen, nämlich ca. 7 % aller in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang und einer Erstzulassung zwischen dem 01.01.1985 und dem 01.10.2010.

3 Ermittlung möglicher Auswirkungen von Alterung, Verschleiß, Beschädigung und Manipulation von Bauteilen sowie Funktionen des elektrischen Antriebsstrangs auf die Verkehrssicherheit und Umwelt

3.1 Allgemeine theoretische Betrachtungen zu Alterung, Verschleiß und Beschädigung elektrischer Bauelemente

Widerstände

Widerstände als Bauelemente werden in der Leistungselektronik nur indirekt als Spannungsteiler zur Messwertaufnahme für die steuernde Mikroelektronik angewendet. Widerstände dienen dort außerdem zur Strombegrenzung auf Signalleitungen. Die so genannte Drift der Widerstandswerte (Änderung mit der Temperatur) ist bei diesen Anwendungen von geringer Relevanz. Die Langzeitstabilität des Wertes, das heißt die Wertänderung mit der Lebensdauer, kann je nach verwendeter Widerstandstechnologie kritisch sein. Wird die Dickschichttechnologie eingesetzt, liegt die maximale Widerstandsänderung pro 1.000 Betriebsstunden bei 2 %, bei Dünnschichtwiderständen liegt diese lediglich bei 0,1 %. Unter der Annahme, dass dies bei der Komponentenentwicklung berücksichtigt und entsprechend der geforderten Genauigkeit die Widerstandstechnologie ausgewählt wurde, kann die Langzeitstabilität der Widerstände als unkritisch betrachtet werden (BLUM 2007).

Typische Ausfallbilder von Widerständen sind Unterbrechungen oder Drift. Ein Kurzschluss kann im Allgemeinen vernachlässigt werden (BIRO 1997).

Kapazitäten

Die in Kapazitäten gespeicherte elektrische Ladung verursacht eine Anziehungskraft zwischen den beiden Elektroden, die das Dielektrikum widerstehen muss. Diese Anziehungskraft ist abhängig von der gespeicherten Ladung und der Bauform. Kondensatoren werden zur Spannungsglättung, Speicherung von kleinen Energiemengen und bei Zeitgebern eingesetzt.

Kondensatoren mit großen Kapazitäten sind wegen der günstigeren Baugröße als Elektrolytkondensatoren ausgeführt. Der Elektrolyt bildet die Kathode des Kondensators. Das Dielektrikum entsteht durch Elektrolyse. Vor allem diese Technologie weist erhebliche Kapazitätsverluste infolge von Alterungsprozessen und temperaturabhängigen chemischen Vorgängen auf. So verdunstet oder trocknet bei hoher thermischer Belastung der Elektrolyt. Im Vorfeld eines Kapazitätsverlustes verschlechtern sich die Bauteilparameter wie etwa der Ersatzreihenwiderstand. Bei erhöhtem Ersatzreihenwiderstand steigt auch die intern anfallende Verlustleistung an, wodurch die beschriebenen chemischen Prozesse in Folge der verstärkten Erwärmung noch beschleunigt werden. Wird der Druck im Elektrolytkondensator infolge des verdunstenden Elektrolyten zu groß, kann er platzen und somit der Kapazitätswert plötzlich auf null sinken (WIKI 2013, Elektrolytkondensator).

Diese Alterungsprozesse betreffen grundsätzlich auch Doppelschichtkondensatoren, da diese in ihrer Funktionsfähigkeit ebenfalls von einem Elektrolyten abhängig sind.

Keramikkondensatoren unterliegen ebenso einem alterungsbedingtem Kapazitätsverlust. Je nach verwendeter Keramik wirkt sich dieser schon nach Stunden (z. B. bei Klasse 2 mit Keramikart X7R) oder erst nach mehreren Jahren (z. B. Klasse 1 mit NP0-Keramik) spürbar aus. Eine Verringerung der Kapazität wird bei Überschreiten der materialabhängigen Curie-Temperaturen verstärkt und ist nicht vollständig reversibel. Dies führt besonders bei zyklischen oder betriebsabhängigen Temperatursteigerungen zu verstärktem Rückgang der Kapazität. Eine Vorschädigung und der damit verbun-

dene Ausfall von Keramikkondensatoren treten zu meist im Herstellungsprozess auf. 90 Prozent der Ausfälle im Feld sind auf mechanische Spannungen aufgrund der Platzierung auf Biegelinien der Platinen zurückzuführen. Die Auswirkung dabei sind Mikrorisse in der Keramik, die vor allem bei der Montage, beim Transport oder bei der Handhabung hervorgerufen werden. Ist der Keramikkondensator durch die Risse völlig aufgetrennt, kann es durch Verschiebung der metallischen Lagen zu Kurzschlüssen und damit zu totalen Ausfällen der Bauelemente kommen. Ebenfalls wirken sich elektrische Spannungsspitzen, die die normalen Prozessparameter überschreiten, negativ auf die Lebensdauer aus.

Keramikkondensatoren finden aufgrund des ungünstigen Verhältnisses von Baugröße zur Kapazität im Vergleich zu Elektrolyt- und Doppelschichtkondensatoren sowie ihrer Verpolungsfestigkeit vor allem in der nicht leistungsführenden Elektronik Anwendung. Keramikkondensatoren werden zumeist für die Reduzierung der Spannungsspitzen auf einer elektrostatisch geladenen Leiterplatine verwendet, dienen zur Messwertstabilisierung sowie zur Bereitstellung von Energie für Schaltprozesse (WIKI 2013, Keramikkondensator) (ROOD 2012).

Induktivität

Induktivitäten werden zur Glättung oder Filterung von Stromschwankungen sowie zur Energiespeicherung eingesetzt. Sie sind dadurch einer ständigen Frequenzbelastung ausgesetzt.

Induktivitäten werden konstruktiv als Leiterspulen ausgeführt. Hierdurch wird das resultierende Feld verstärkt, und starke elektromagnetische Kräfte wirken auf Leiter und Anschlüsse. Das kann insbesondere bei Leiterplattenmontage zu einem Ausbrechen der Lötanschlüsse und somit zum Kontaktverlust führen.

Die Ausführung als Leiterspule führt im Vergleich zu normalen Leitern bei gleicher Strombelastung und Leiterdicke zu einer erheblich erschwerten Wärmeabfuhr. Dadurch wird die Isolationsfähigkeit des die Leiterschleifen umgebenden Kupferlacks eingeschränkt.

Der Induktivitätswert einer Spule ändert sich aufgrund von Temperaturveränderungen, mechanischen Spannungen sowie über die Zeit. Die zeitabhängige Alterung einer Induktivität wird auch als

Desakkommodation bezeichnet und ist durch die Wanderung von Fe^{2+} -Kationen über Oktaederleerstellen hervorgerufen (TELL 2007) (SCHI 2013).

Eine Reduktion der Induktivität kann auch durch Kurzschluss einzelner Wicklungen hervorgerufen werden. Kurzschluss und Unterbrechung sowie Drift sind verbreitete Ausfallszenarien von Spulen (BIRO 1997).

Halbleiter

Halbleiter finden sowohl in der Leistungselektronik als Dioden und MOSFET als auch in der Mikroelektronik Anwendung. Im Bereich der Mikroelektronik ist nicht mit einer Beeinträchtigung der Funktion während der Lebenszeit zu rechnen. Hier treten diese Effekte in sehr viel geringerem Maße auf, und Schäden führen zu einem Totalausfall der Funktionsgruppe. Auf Halbleiterebene kommen folgende Alterungs- und Verschleißeffekte zum Tragen (STEL 2008):

- Gate-Oxide wear-out: Störstellen im Gate verringern die effektive Dicke des Isolators. Sie halten auch im Sperrzustand Ladungsträger (d. h., das Sperrvermögen des Drain-Source-Kanals sinkt).
- Gate-Oxide break-out: Es bilden sich Strompfade im Isolator aus, wodurch weitere Störstellen entstehen und es zur Bildung eines durchgängigen Strompfades kommt.

Sowohl wear-out als auch break-out bewirken drastisch erhöhte Leckströme, verstärken das Ausbilden von Strompfaden und in letzter Konsequenz den Durchschlag der Halbleiterschalter. Da die Leckströme von der zu sperrenden Spannung abhängig sind, laufen die genannten Effekte schneller ab, je höher diese ist.

Durch das rein Ohm'sche Verhalten der Drain-Source-Strecke werden MOSFET zumeist bei niedrigeren Spannungen in integrierten Schaltungen eingesetzt. Wird er mit zu hohen Strömen belastet, kann der MOSFET sich erhitzen und durch innere Spannungen zerbersten. Denkbare Ausfallverhalten von Halbleitern ist der Kurzschluss und die Unterbrechung (BIRO 1997).

Mechanische Schalter

Mechanische Schalter wie Schütze und Relais werden eingesetzt, wenn bei niedrigen Schaltfrequen-

zen geringe Ströme geschaltet werden müssen und nach dem Schaltvorgang hohe Ströme fließen sollen. Ein großes Problem bei Schützen und Relais ist das Schalten unter Last, d. h. das Unterbrechen eines Stromflusses. Hierbei kann es zum so genannten Kontaktabbrand kommen. Dieser ist gekennzeichnet durch Materialabtrag an der positiven Elektrode verbunden mit Materialauftrag an der negativen Elektrode (Elektromigration). Es besteht die Gefahr des Funktionsverlustes an Relais und Schützen, die häufig als Sicherheitsvorkehrung den Leistungskreis unterbrechen. Es kommt dabei nicht nur zu Kontaktverlust, sondern auch zur besonders kritischen Kontaktverschmelzung, sodass das Schaltelement nicht mehr geöffnet werden kann (BIRO 1997).

Verbindungstechnik (Lötverbindungen, Leiterbahnen, Kabel, Stecker)

Auf den Leiterplatten der Mikroelektronik werden die Verbindungen zwischen den Bauelementen durch Leiterbahnen und Lötunkte hergestellt. In der Leistungselektronik werden hierzu Kabel und Stecker eingesetzt.

Die Leiterbahnen führen Ströme und Signale auf der Leiterplatte. Leiterbahnen haben im Vergleich zur Dicke eine große Breite, sodass die am Leitungswiderstand anfallende Verlustwärme gut abgeführt werden kann. Gefährlich sind allerdings mechanische Spannungen in der Leiterplatte, die zum Abreißen oder zum Ablösen der Leiterbahn vom Basismaterial führen können. Dies ist beispielhaft für die als „Thermal Mismatch“ bezeichnete Erscheinung. Allgemein wird damit das Zerstören bzw. Aufbrechen von Verbindungen infolge unterschiedlicher Temperaturexpansionskoeffizienten bezeichnet.

Für Lötverbindungen gilt Ähnliches, wobei die Gefahr in erster Linie von den auf die Bauteile wirkenden Kräften ausgeht. Diese Kräfte sind relevant bei Bauelementen mit großem Trägheitsmoment (hohes Gewicht und Ausdehnung), bei Anschlussstellen von Steckern und Buchsen sowie bei Bauelementen mit hoher Temperaturexpansion oder Schwingungsbelastung infolge elektrischer Felder.

Die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs sind über größere Strecken energetisch und kommunikativ durch Kabelleitungen verbunden. Beansprucht wird in erster Linie die Kabelisolation durch

die Temperaturdifferenz zwischen der intern anfallenden Verlustwärme und der Umgebungstemperatur sowie durch eventuell auftretenden Abrieb. Bei der Verlegung ist außerdem auf ausreichende Biegeradien zu achten, um Kabelbrüche auch durch Wärmeausdehnung zu verhindern.

Stecker stellen die Verbindung von Kabeln mit Geräten und zwischen Kabelleitungen her. Vor allem im ersten Fall müssen sie die gesamten auf die Leitung wirkenden Kräfte aufnehmen und trotzdem eine sichere Verbindung gewährleisten. Durch den Ladungsträgertransport treten an Steckern außerdem Kontakt- und Elektromigration auf. Darunter sind die Wanderung von Metallatomen von einem in den anderen Kontaktwerkstoff und die damit ein tretende Diffusion zu verstehen (THOB 2002).

Die vorangegangenen Alterungs- und Verschleißerscheinungen von elektrischen Bauelementen werden durch folgende äußere Einwirkungen beschleunigt:

Elektrische Belastungsintensität

Die Auswirkung der Belastungsintensität ist abhängig von der Auslegung der elektronischen Bauelemente. Je höher die Betriebslast bzw. je länger Bauelemente mit Überlast betrieben werden, desto stärker verringert sich ihre Lebensdauer. Indirekt führen hohe elektrische Belastungen durch Temperaturerhöhungen auch zu klimatischen Belastungen an umgebenden Bauelementen.

Im Allgemeinen ist zu erwarten, dass der Betrieb mit Überlast durch die ansteuernde Elektronik verhindert oder zumindest zeitlich begrenzt wird.

Impuls-, Frequenzbelastung

Diese Form der elektrischen Belastung bewirkt durch elektromagnetische Effekte eine Vibration der Bauelemente. Dabei werden Kontakt- und Anschlusspunkte umso stärker belastet, je starrer sie sind.

Temperatur

Einige Halbleiterparameter wie z. B. der Leckstrom weisen eine Temperaturabhängigkeit auf. Weiterhin begünstigen extreme Temperaturen Thermal Mismatch und mechanische Spannungen sowie in Verbindung mit Feuchte die Bildung von Eis.

Feuchte

Die Feuchtigkeit hat große Auswirkungen auf Isolierstoffe, insbesondere in Verbindung mit Streusalz. Abgesehen vom direkten Eindringen durch etwa Spritzwasser, erfolgt das Eindringen von Feuchte auch durch Betauung, d. h. das Kondensieren von Schwitzwasser bei Temperaturänderungen.

Luftdruck

Das Isolationsvermögen mechanischer Schalter ist abhängig vom Luftdruck. Luftdruckänderungen begünstigen indirekt auch das Eindringen von Feuchte in hermetisch abgeschlossene Bauelemente.

Vibration

Vibrationen verursachen bei dauerhaftem Einwirken – wie im Automobilbereich üblich – eine Verringerung der Elastizität und können somit Ermüdungsbrüche bewirken. Dieser Gefahr sind besonders die relativ starren Hochvoltkabel ausgesetzt. Weiterhin können sich Schraubverbindungen und -anschlüsse lockern oder lösen.

Staub

Staub setzt sich mit zunehmender Lebensdauer in immer stärkeren Schichten im Fahrzeug ab und kann je nach Zusammensetzung, etwa als Feinstaub aus Autoabgasen, chemische Prozesse verursachen. Auch mechanische Schalter werden in ihrer Funktion beeinträchtigt, wenn sie nicht hermetisch abgedichtet sind. Weiterhin wird die Ableitung von Wärme behindert. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge begünstigen die Staubschichtbildung durch elektrische Felder noch zusätzlich.

Chemie

Das Einwirken von aggressiven Stoffen kann erheblich sein, jedoch verstärken sie meist nur andere schädliche Effekte (z. B. Korrosion). Zu den aggressiven Stoffen gehören Streusalze, Abgase wie das reaktionsfreudige Kohlenmonoxid und das aus Kunststoffen entweichende Chlor.

Tiere

Bei Fahrzeugen sind Beanspruchungen durch Tiere vor allem als Marderschäden bekannt. Bei elek-

trisch angetriebenen Fahrzeugen besteht Gefahr für die Hochvoltkabel. Hier kann ein beschädigter Kabelmantel bereits den Isolationswiderstand verringern, sodass bestenfalls der Isolationswächter das Zuschalten des HV-Systems verhindert.

Starke Beschleunigungen

Beim Auftreten von großen Beschleunigungen (beispielsweise bei einem Unfall) kann es – vor allem bei Bauteilen mit hoher Massenträgheit – zum Aufbrechen der elektrischen Verbindung kommen. Darüber hinaus dürfen integrierte Schaltkreise oft nur mit einer bestimmten maximalen Beschleunigung belastet werden. Ein Überschreiten dieser Maximalbeschleunigung führt zum Funktionsverlust des Schaltkreises.

Deformation

Die elektrischen Bauelemente sind immer in einem Gehäuse untergebracht. Eine Deformation des Gehäuses kann zur Folge haben, dass die Leiterplatten großen mechanischen Spannungen ausgesetzt sind und somit Leiterbahnen, Lötverbindungen sowie Bauteile aufbrechen. Weiterhin kann es bei Einsatz einer Flüssigkeitskühlung zu Undichtigkeiten kommen, dann sind die Bauelemente während des Betriebs nicht mehr ausreichend gekühlt. Bei Kabeln und Steckern kann eine Deformation zum Zerreißen oder Quetschen führen.

Fazit

Grundsätzlich werden Alterungs- und Verschleißeffekte in der Elektrotechnik durch hohe Stromdichten, das heißt hohe Amperewerte bei geringen Leiterquerschnitten, erheblich begünstigt. Dies ist problematisch für die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs, da der Fahrzeughersteller einen Kompromiss zwischen Leitungsquerschnitten und Gewicht beziehungsweise Platzbedarf eingehen muss. Zum anderen durchqueren die leistungsführenden Leitungen das gesamte Fahrzeug und sind den fahrzeugtypischen Einflüssen besonders ausgesetzt. Die im Kraftfahrzeug geforderte hohe Leistungsdichte und der hohe Integrationsgrad erschweren zusätzlich die Abführung von Verlustenergie in Form von Wärme.

Die Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der elektrischen Bauelemente sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Bauelement	Alterungs-/Verschleiß-/Beschädigungserscheinung
Widerstand	Wertedrift
	Unterbrechung
Kapazität	Kurzschluss
	Unterbrechung
	Kapazitätsverlust
Induktivität	Unterbrechung
	Kurzschluss
	Induktivitätsverlust
Halbleiter	Unterbrechung
	Kurzschluss
Mechanische Schalter	Unterbrechung
	Kurzschluss
Leiterbahnen und Lötstellen	Unterbrechung
	Kurzschluss
Kabel und Stecker	Isolationsfehler
	Unterbrechung
	Kurzschluss

Tab. 2: Übersicht der Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen elektrischer Bauelemente

3.2 Auswirkungen von Alterung, Verschleiß und Beschädigung auf die identifizierten Bauteile eines elektrischen Antriebsstrangs

Nachfolgende Ausführungen treffen Annahmen zu den Auswirkungen von Alterung, Verschleiß und Beschädigung auf die einzelnen Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs. Die in diesem Kapitel getroffenen Annahmen beruhen auf den im Kapitel 3.1 dargestellten Auswirkungen von Alterung, Beschädigung und Verschleiß von elektrischen Bauelementen.

3.2.1 Auswirkungen auf die Sensorik

Stromsensoren

Zur Strommessung, die beispielsweise für die Stromregelung der Wechselrichter oder das Batteriemanagementsystem notwendig ist, können die Sensoren entweder potenzialfrei oder direkt in den zu messenden Stromkreis eingebracht sein.

Aufbau und Funktionsweise

Wenn der Strom nicht potenzialfrei gemessen werden kann, wird ein Messwiderstand mit möglichst

geringem Widerstand seriell in den Stromkreislauf eingebaut. Über dem Messwiderstand fällt dann die zum Strom proportionale Messspannung ab, die über eine Verstärkerschaltung aufbereitet wird. Bei größeren Strömen muss der Messwiderstand entsprechend mechanisch und thermisch stabil ausgelegt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Messwiderstand selbst und auch die Verstärkerschaltung den Messwert beeinflussen. Diese Art der Strommessung ist zwar preiswert und genau, wird jedoch vermehrt durch die potenzialfreien Messmethoden verdrängt.

Bei den potenzialfreien Methoden ist zwischen direkt abbildenden Stromsensoren, Kompensationswandlern mit Hallsonden und Kompensationsstromwandlern mit weichmagnetischer Sonde zu unterscheiden. Bei allen wird ein Ringkern aus magnetisch leitendem Material um den stromdurchflossenen Leiter gelegt. Dieser erzeugt im Ring ein Magnetfeld und wird durch die entsprechende Sonde in eine Spannung umgewandelt. Die Messspannung wird anschließend über eine Verstärkerschaltung auf ein höheres Niveau für die Auswertung gewandelt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Bei der Messung über einen Messwiderstand besteht immer die Gefahr einer Drift des Widerstandswertes. Verstärkt wird dieser Effekt durch hohe Temperaturen und hohe Stromstärken. Sie liegt allerdings in vernachlässigbarer Höhe, da sich Messwiderstände durch eine hohe Präzision sowie eine sehr geringe Drift und geringe Temperaturabhängigkeit auszeichnen.

Bei den potenzialfreien Messmethoden wird die Wechselwirkung zwischen Strom und magnetischem Feld zum Messen ausgenutzt. Durch zu hohe Ströme kann es im Ringkern um den Leiter zu einer Restmagnetisierung des Kerns kommen (Remanenz), wodurch vor allem um die Nullpunkt-lage des Messwertes Abweichungen entstehen.

Die Verstärkerschaltung besteht überwiegend aus Halbleitern, Widerständen und Kapazitäten, bei denen Alterungs- und Verschleißerscheinungen auftreten können. Diese können eine Verstärkung des Rauschanteils an der Ausgangsseite der Verstärkerschaltung bewirken. Ein weiterer Punkt ist die natürliche Abweichung in der Nullpunkt-lage bei Verstärkern. Dieser so genannte Offset hat eine temperaturabhängige Drift, die auch mit der Alterung zunimmt (WIKI 2013, Stromsensor).

Spannungssensoren

Spannungssensoren werden zur Spannungsmessung eingesetzt.

Aufbau und Funktionsweise

Die zu messenden Spannungen können direkt zu den auswertenden Steuergeräten geleitet oder über einen Schaltkreis mit integriertem Analog-Digital-Wandler gemessen werden. Bei Spannungen, die größer sind, als es der eingesetzte Schaltkreis bzw. das Steuergerät erlauben, müssen Widerstandskaskaden genutzt werden. Über die einzelnen Widerstände der Kaskade, die sehr genau ausgelegt sind, fällt dann eine Spannung ab, die proportional zur Messspannung ist und ausgewertet werden kann. Darüber hinaus wird bei sehr großem Potenzialunterschied ein Vorwiderstand als Strombegrenzung eingesetzt. Da der Messstrom einen sehr geringen Wert aufweist, verändert der Vorwiderstand den Messwert nur geringfügig.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die zur Spannungsmessung eingesetzten Widerstände unterliegen den genannten Verschleißerscheinungen. Auch die Temperatur hat hier Einfluss auf den Messwert. Problematisch bei der Spannungsmessung ist die Korrosion der Messanschlüsse, da es durch die so entstehende Erhöhung des Kontaktwiderstands zu Veränderungen des Widerstandsverhältnisses der Widerstandskaskaden kommt. Außerdem kann ein Kurzschluss oder eine Unterbrechung dazu führen, dass sich die Spannung gar nicht mehr messen lässt. Ausfälle von Spannungssensoren können auch durch korrosionsbedingte Erhöhung des Übergangswiderstands bei den Steckverbindern sowie durch Kabelbrüche hervorgerufen werden.

Temperatursensoren

Temperaturerfassung basiert auf der Spannungsmessung. Je nach Anwendung werden temperaturabhängige Widerstände, Thermoelemente oder integrierte Schaltkreise eingesetzt.

Aufbau und Funktionsweise

Bei der Messung einer Temperatur über einen temperaturabhängigen Widerstand wird dieser von einem konstanten Strom durchflossen und die abfallende Spannung ausgewertet. Das Messprinzip

des Thermoelements beruht auf dem Seebeckeffekt. Grundlage dieses Effekts ist, dass bei einem Stromkreis aus zwei verschiedenen elektrischen Leitern durch eine Temperaturdifferenz an der Kontaktstelle eine kleine elektrische Spannung entsteht. Somit können mit Thermoelementen nur Temperaturdifferenzen erfasst werden. Soll ein absoluter Temperaturwert ermittelt werden, ist zusätzlich die absolute Temperatur über einen anderen Temperatursensortypen zu ermitteln und mit der ermittelten Temperaturdifferenz zu addieren. Eine weitere Möglichkeit, Temperaturen zu messen, besteht darin, die linearen und vorhersehbaren thermischen Eigenschaften von PN-Übergängen auszuwerten. Bei dieser Methode können Temperatursensoren inklusive der notwendigen Verstärker-, Signalaufbereitungs- und Auswerteschaltungen in einem herkömmlichen Halbleiterprozess gefertigt werden. Die so entstandenen integrierten Schaltkreise nehmen eine dem Einsatzzweck angepasste Form an (NAU 2004).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Verschleiß kann ausgeschlossen werden, weil diese Sensoren in Gehäusen eingefasst sind und nicht weiter beansprucht werden. Es können aber Störungen bei der Messwertfassung am Fühler durch Temperaturschocks und somit Messwertschwankungen entstehen. Die Alterung eines drahtgewickelten Keramik-Sensors (PT-100) führt zu einer nicht relevanten Widerstandsveränderung (NAU 2004).

Dies tritt bei Thermoelementen gleichermaßen auf. Die Messwertaufbereitung (Verstärkerschaltung) besteht aus Halbleiterbauelementen sowie Widerständen und weist die Alterungserscheinungen analog zu den Stromsensoren auf. Eine große Schwachstelle ist wie bei anderen Sensoren auch die Kontaktkorrosion an den Steckern sowie Kabelbrüche.

Drucksensoren

Drucksensoren im Fahrzeug messen Wasser-, Öl- oder Luftdruck. Zu nennen sind hier zu Beginn der Bremsdrucksensor und der Unterdrucksensor im Bremskraftverstärker.

Aufbau und Funktionsweise

Eine Methode der Druckerfassung basiert auf der Grundlage des piezoresistiven Wirkprinzips. Auf

einer Membran aus Siliziumsubstrat sind vier Dehnmessstreifen eingefasst, die zu einer Wheatstone'schen Brücke verschaltet sind. Bei Verformung der Membran durch Druckerhöhung verstimmt sich die Brücke, und die abgreifbare Brückenspannung ist dabei proportional zum Differenzdruck zwischen Membranvorderseite und -rückseite.

Eine andere Form der Druckerfassung ist die elektromechanische: Eine über Druck verformte Membran bewegt hierbei einen Schleifkontakt auf einem Widerstand, an dem die entsprechend dem Druck veränderte Spannung abgegriffen werden kann (CONT 2013).

Dieses Messprinzip ist sehr verschleißanfällig, daher wird bei aktuellen Fahrzeugen das piezoresistive Prinzip eingesetzt (HUPP 2011).

Der Referenzdruck hängt bei beiden Messprinzipien von der sekundären Seite der Membran ab. Wird ein geschlossener Sensor zur Absolutdruckmessung verwendet, muss die Sekundärseite evakuiert sein.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die elektrische Verbindung zur Fahrzeugelektronik ermöglichen Kabel und Stecker, die korrodieren oder abgerissen werden können. Bei piezoelektrischen Messaufnehmern sind die Auswirkungen von Alterung und Verschleiß auf die Messwerte zu vernachlässigen. Es kommt meist zu einem Komplettausfall des Sensors.

Membranwegsensoren (Wegsensoren)

Der Membranwegsensoren findet im Bremskraftverstärker als Wegsensoren Anwendung.

Aufbau und Funktionsweise

Der Membranwegsensoren ist fest an der Rückseite des Bremskraftverstärkers verbaut und als Potenziometer ausgelegt. Der Schleifkontakt ist über eine Verlängerung mit der Membran des BKV verbunden, sodass sich über deren Verschiebung linear der abgegriffene Widerstand ändert (WIES 2013).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Potenzimeter sind robust aufgebaute Sensoren. Ein Risiko besteht in der Bewegung des Verbindungssteiges zur Membran, der unter Umständen den Kontakt durch Beschädigung verlieren kann.

Darüber hinaus können durch Alterungserscheinungen die Kontakte korrodieren und sich somit der Widerstandswert verändern. Des Weiteren können sich durch äußere Einflüsse wie Temperaturschwankungen Bruchstellen an Kontakten, Lötstellen oder Leiterschleifen bilden (HELA 2012).

Raddrehzahlsensor

Die Messung der Raddrehzahlen dient primär der Geschwindigkeitserfassung des Fahrzeuges. Außerdem sind sie für den Betrieb von Fahrsicherheitssystemen wie ABS oder ESP notwendig, um kritische Zustände des Fahrzeugs wie beispielsweise Blockieren oder Durchdrehen von Rädern zu erkennen.

Aufbau und Funktionsweise

Für die Messung der Raddrehzahlen im Fahrzeug sind drei Messprinzipien bekannt. Sie reagieren alle auf die Änderung eines magnetischen Feldes, welches ein fest mit der Radnabe montiertes Impulsrad auslöst.

Der induktive Raddrehzahlsensor ist in seinem Sensorkopf mit einem Dauermagneten und weichmagnetischem Kern ausgestattet, der von einer Spule umwickelt ist. Das Impulsrad dreht in geringem Abstand am Sensorkopf und ist als Zahnrad oder gestanzter Impulskäfig ausgelegt. Es sorgt für eine der Drehzahl proportionale Änderung des Magnetfeldes durch die Spule, wodurch eine sinusförmige Spannung induziert wird. Durch Auswertung der Frequenz wird die Raddrehzahl ermittelt.

Ein verbreiteteres Messprinzip ist die Verwendung eines Hallsensors. Hier kann das Impulsrad auch mit Permanentmagneten wechselnder Orientierung bestückt sein. Durch den Halleffekt wird am Sensorkopf ebenso eine Sinus-Spannung erzeugt, deren Amplitude sich im Gegenzug zum induktiven Sensor aber nicht mit steigender Drehzahl erhöht. Eine Signalaufbereitung inklusive Quantisierung ist dem Sensor inhärent.

Eine relativ neue Messmethode ist die magnetoresistive Drehzahlmessung (MR). Durch Einfluss des Magnetfeldes ändert sich der Widerstand der Messsonde, der daraufhin durch eine Wheatstone'sche Brücke ausgewertet, ebenso wie beim Hallsensor vor Ort quantisiert und an das Steuergerät gesendet wird. Beide Messmethoden benötigen im Gegensatz zum induktiven Verfahren eine

zusätzliche Stromversorgung. Deshalb werden sie auch als aktive Sensoren bezeichnet.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Induktive Drehzahlgeber haben das Problem, bei hohen Drehzahlen eine hohe Spannung zu erzeugen, was die Auswerteschaltung belastet.

Bei allen Raddrehzahlsensoren ist das Gehäuse der Sensorköpfe gut gekapselt und somit vor Schmutz, Feuchtigkeit und mechanischen Schlägen geschützt. Jedoch sind die Sensorköpfe und Impulsräder direkt am Radträger verbaut und somit relativ frei im Radkasten zu erreichen. Dadurch sind sie erhöhten mechanischen Belastungen wie Vibrationen, Schlägen (auch Steinschlägen), Schmutz und Einfluss durch Tiere ausgesetzt. Auch wird das Sensorsystem während der Fahrt nur durch das Rad gefedert, ist also extremen Beschleunigungen ausgesetzt. Hierdurch kann es zu Schäden am Impulsrad (z. B. Zahnausbruch), Verstellung der Sensorkopfposition und somit Erhöhung des Luftspaltes oder Halterungsbeschädigungen des Sensorkopfes kommen. Auch kann die Signalleitung schnell in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Auswerteschaltungen der aktiven Sensoren können alterungsbedingt durch die Widerstandsschaltungen eine Abweichung in der Genauigkeit erfahren. Außerdem kann bedingt durch eine abweichende Versorgungsspannung der Rauschanteil des Signals deutlich zunehmen (BÖHM 2010).

Rotorpositionssensor

Rotorpositionssensoren werden auch als Encoder bezeichnet. Sie geben Lage und Drehrichtung des Rotors aus. Für die Erfassung gibt es verschiedene Messsysteme. Die Lage des Rotors ist vor allem für die Regelung von Synchronmotoren entscheidend, da die verschiedenen Statorspulen gezielt je nach Lage des Rotors angesteuert werden müssen.

Aufbau und Funktionsweise

Es gibt prinzipiell zwei verschiedene Arten der Rotorlageermittlung: Zum einen kann sie über Absolutwertgeber und zum anderen über Inkrementalgeber ermittelt werden. Absolutwertgeber besitzen eine Codescheibe, die auf dem Rotor aufgebracht ist. Jeder Winkelposition ist ein bestimmter Code zugeschrieben, der opto-elektronisch ausgewertet wird (SEW 2013).

Inkrementalgeber geben ein sich wiederholendes Signalmuster. Die Signale sind entweder rechteckartig oder sinusförmig. Um die Richtung und Lage festzustellen, werden zwei Signale desselben Typs ausgewertet, die zueinander um 90° phasenverschoben sind. Hierdurch lässt sich außerdem die Drehrichtung feststellen.

Zahnräder oder gestanzte Impulsräder haben sich für die Antriebsregelung als ungenau erwiesen. Auch ist eine opto-elektronische Auswertung des Gebersignals anfällig für hohe Temperaturen und Verschmutzung, wie sie im mobilen Bereich zu erwarten sind. Es haben sich zwei Inkrementalgeberprinzipien in der Elektromobilität durchgesetzt: der Resolver und der Rotorlagegeber auf Wirbelstrombasis.

Der Resolver besteht aus einer Rotorspule, die über eine externe Spule im Stator eine Spannung induziert bekommt. Auf dem Stator sind weiterhin zwei um 90° versetzte Spulen angeordnet, in die wiederum die Rotorspule eine Spannung induziert, die ebenso um 90° versetzt ist. Aus den beiden sinusförmigen Signalen der Statorspulen können die Lage, Drehrichtung und Geschwindigkeit des Rotors ermittelt werden. Der Aufbau ist in Bild 5 dargestellt.

Beim Rotorlagegeber auf Wirbelstrombasis werden entweder axial oder radial zum Rotor zwei Spulenpaare versetzt statorfest angebracht. Am Rotor selbst befindet sich eine Signalscheibe (Target), die in ihrer Oberflächenform Sinuswellen nachbildet. Die Anzahl der Perioden entspricht idealerweise der Anzahl der Polpaare der zu regelnden Synchronmaschine. Die Spulenpaare sind um 90° der Periode einer Schwingung der Signalscheibe ver-

setzt. Das Target besteht aus einem isolierenden Träger, auf dem eine dünne Schicht leitfähiges Material aufgetragen ist. Die Spulen des Sensors induzieren über ein hochfrequentes Magnetfeld Wirbelströme in das Target. Diese Wirbelströme wiederum haben eine Rückwirkung auf die Impedanz der Spulen, die über eine Schaltung ausgewertet wird (SCHÄ 2009).

Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 6 dargestellt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Wie bereits erwähnt, haben sich Inkrementalgeber bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang durchgesetzt. Diese Systeme arbeiten kontaktfrei, weswegen keine Verschleißerscheinungen zu erwarten sind. Vibrationen und Schläge gehen primär von der Antriebsseite oder der Anregung des Fahrzeuges durch die Fahrbahn aus und begünsti-

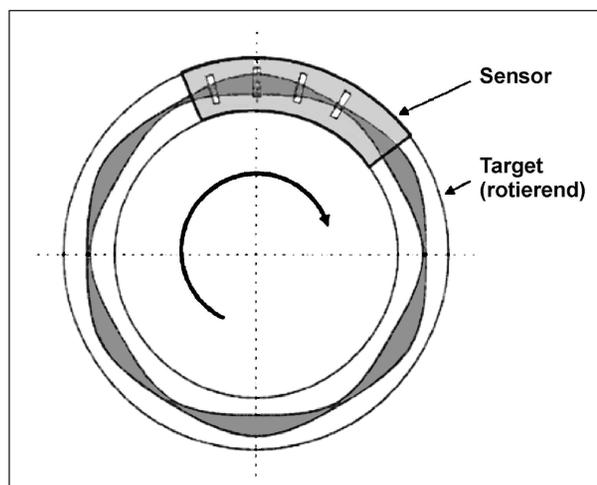


Bild 6: Aufbau axialer Rotorlagegeber und Geberspur (SCHÄ 2009)

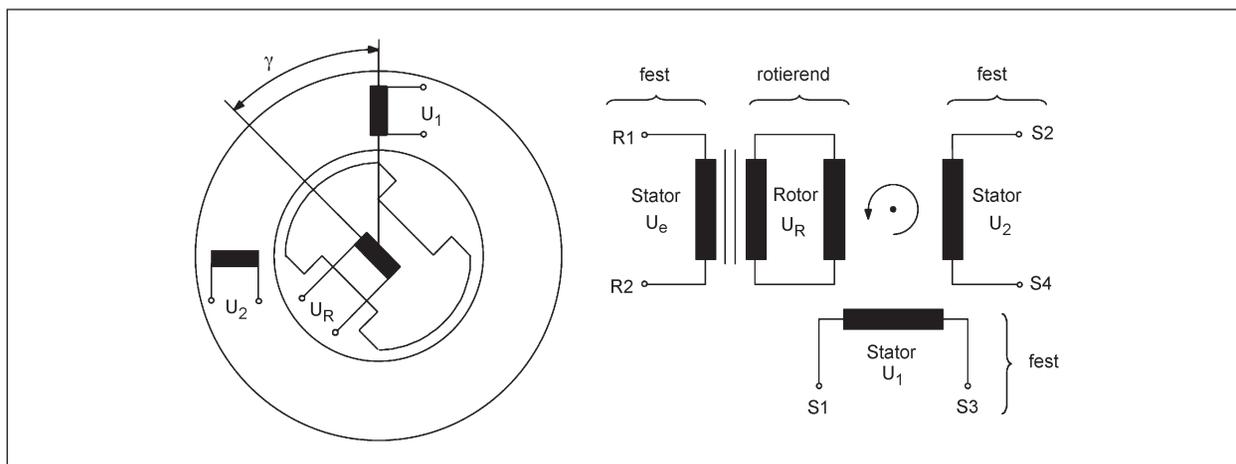


Bild 5: Schematischer Aufbau des Resolvers (SEW 2012)

gen somit Verschleißerscheinungen der Spulen (vor allem Unterbrechung). Die Auswertung der Sensorsignale ist über eine Spannungsmessung realisiert, die über die Alterung eine gewisse Drift vorweist. Da aber nicht die Amplitude, sondern die Phase der Signale ausgewertet wird, ist dies bei einer ausreichend großen Amplitude als unkritisch zu bewerten. Mit einer Verschiebung des Phasenversatzes der beiden Messpunkte von Drehzahlgebern auf Wirbelstrom- und Resolverbasis ist tendenziell nicht zu rechnen. Raddrehzahlsensoren sind zwar gekapselt, allerdings kann der Einfluss von Feuchtigkeit durch die starken Temperaturschwankungen sowie Korrosion der Befestigungen und die damit verbundene mechanische Verformung nicht vernachlässigt werden. Der anfälligste Part der Sensoren sind die Stecker und Kabel, die den Vibrationen des Antriebsstrangs ausgesetzt sind.

Fahrdynamiksensor

Der Fahrdynamiksensor dient der Erfassung von Bewegungszuständen des Fahrzeugs, insbesondere der Längs- und Querschleunigung sowie der Gierrate (Drehgeschwindigkeit um die Hochachse des Fahrzeugs).

Aufbau und Funktionsweise

Der Beschleunigungssensor ist gewöhnlich als mikro-elektro-mechanisches System (MEMS) aus-

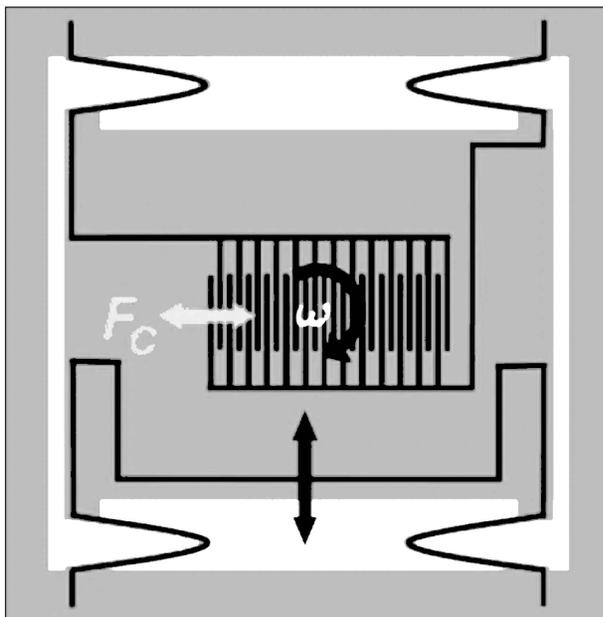


Bild 7: Schema eines mikromechanischen Gierratensensors (WALL 2006)

gelegt und wird meistens aus Silicium gefertigt. Der Sensor ist ein winziges Feder-Masse-System. Die Aufhängung und die Masse sind beide Elektroden einer Kapazität, die sich bei Beschleunigung in die entsprechende Richtung linear ändert und gemessen wird.

Drehratensensoren nutzen das Prinzip der Corioliskraft, die auf einen Körper wirkt, der sich in einem rotierenden System in linearer Richtung bewegt. Der Aufbau ist ähnlich dem Beschleunigungssensor mit dem Unterschied, dass die winzige Masse in Längsrichtung über einen Magneten zum Schwingen in der Eigenfrequenz angeregt wird (s. unterer Pfeil Bild 7). Erfährt das Fahrzeug eine Rotation um die Hochachse, wird die Masse in Querrichtung ausgelenkt und verändert die Kapazität der Kammstruktur (WALL 2006).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da es sich bei diesem System um eine winzige Masse handelt, ist es gegenüber Beschleunigungen außerhalb des Messbereiches sehr resistent. Durch die Kapselung und den geschützten Einbauport ist der Einfluss von Feuchtigkeit ebenfalls zu vernachlässigen.

Alterungserscheinungen an den Verstärkerschaltungen (s. Stromsensor) bewirken ein verstärktes Signalrauschen sowie ein Offset. Das Lösen der Befestigung des Fahrdynamiksenors hat ebenfalls ein verstärktes Signalrauschen zur Folge.

Beim Drehratensensor kommt eine Veränderung der Eigenfrequenz der Masse aufgrund von Temperaturveränderungen hinzu. Dies kann dazu führen, dass sich die Empfindlichkeit des Sensors verschlechtert.

Pedalsensor

Der Pedalsensor gibt die Stellung des Fahrpedals bzw. Bremspedals als elektrisches Signal an die Motor- und Bremssteuerung weiter.

Aufbau und Funktionsweise

Zur Erfassung der Pedalstellung gibt es verschiedene Verfahren. Ein erstes Verfahren arbeitet mit einem induktiven Sensor, der berührungslos die Stellung des Pedals und damit die Drehung einer Rotorschleife als induktives Spannungssignal aufnimmt. Das Feld wird von einer Erregerspule gene-

riert. Das Signal nimmt eine Empfängerspule, die auch auf der Platine aufgedruckt ist, auf und gibt es an einen integrierten Schaltkreis weiter (HELL 2012).

Eine weitere Methode arbeitet mit einem Wegsensor (Potenziometer). Das Pedal bewegt dabei den Schleifkontakt des Potenziometers, über dem die Spannung gemessen wird. Da Potenziometer sehr verschleißanfällig sind, werden grundsätzlich zwei Potenziometer parallel geschaltet und die Abweichung zwischen diesen bei der Pedalpositionsbestimmung berücksichtigt.

Eine andere Erfassung für die Pedalstellung ist ein programmierfähiger linearer Hallgeber, der in der Mitte eines Rundmagneten steht, während dieser mit dem Pedal bewegt wird (MELE 2012).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch Alterung können Kontakte korrodieren oder durch äußere Einflüsse wie Temperaturschwankungen Bruchstellen an Kontakten, Lötstellen oder Leiterschleifen entstehen, wodurch das Wegepotenziometer hochohmiger wird. Die daraus resultierenden Kontaktschwankungen müssen geglättet werden. Hallgeber hingegen haben fast keinen Verschleiß, ihr Ausfall ist dennoch durch Halbleiterbauelemente möglich.

Schalter/Taster

Schalter und Taster dienen als Bedienelemente in der Fahrgastzelle bzw. lösen Steuer- und Informationssignale aus und schalten somit indirekt Verbraucher.

Aufbau und Funktionsweise

Schalter können als Schließer oder Öffner ausgelegt sein. Sie schließen oder öffnen Kontakte über eine mechanische Betätigungseinheit, die über einen Einrast-, Kipp- oder Federmechanismus realisiert ist. Taster können ebenso als Schließer oder Öffner konzipiert werden, verfügen aber nicht über einen Mechanismus, der den Schaltzustand beibehält, sondern schließen oder öffnen die Kontakte nur, solange der Taster betätigt wird.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Je nach geschaltetem Stromkreis können auch Lasten unterbrochen werden, was an den Schal-

terkontakten mitunter zum Kontaktabbrand führt. Außerdem können je nach Verbauort der Schalter bzw. Taster (z. B. Türkontaktschalter) äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit wirken. Beides führt zu Verschleiß der Kontakte und somit zu einem erhöhten Übergangswiderstand. Das kann dazu führen, dass sich trotz geschlossenen Kontakts der Stromkreis nicht schließen lässt. Da Schalter mechanisch betätigt werden, kann dies auch zu Verschleiß und Beschädigung der Betätigungseinrichtungen führen, wie etwa der Abbruch von Hebeln oder Kippvorrichtungen.

Airbagsensor

Der Airbagsensor ist ein Beschleunigungssensor, der die Beschleunigung des Fahrzeuges in der Richtung des Aufpralls (Längsbeschleunigung für den Frontairbag) misst und an das Airbagsteuerggerät weitergibt. Für den Seitenairbag ist ein Drucksensor in der Tür verbaut. Er stellt die Druckänderung in der Tür fest, die durch einen Seitenaufprall des Fahrzeuges hervorgerufen wird.

Aufbau und Funktionsweise

Der Beschleunigungssensor des Airbags ist analog zu den Beschleunigungssensoren im Fahrdynamiksensor (vgl. S. 26) aufgebaut. Ebenso wurden die Drucksensoren bereits erläutert (vgl. S. 23).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da im Falle eines Airbags die Beschleunigung mit einem Referenzwert verglichen wird, ist die absolute Beschleunigung nachrangig, da der Schwellwertübertritt das entscheidende Ereignis ist. Durch Messungenauigkeiten lässt sich der Schwellwert allerdings früher oder später als beabsichtigt erreichen und kann dementsprechend driften. Hervorgerufen werden die Drift und die Ungenauigkeit vordergründig durch die Verschleißerscheinungen an der anschließenden Verstärkerschaltung (s. Stromsensor). Durch mechanische Beschädigungen kann es ebenso zum Auslösen des Airbagmechanismus kommen. Daher ist der Sensor redundant aufgebaut.

Fazit

Die Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungsercheinungen der Sensoren sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Sensor	Auswirkung Alterung/Verschleiß/ Beschädigung
Stromsensor	Ausfall Messsignal
	Abweichung Nullpunktlage
	Unterbrechung des zu messenden Stromkreises
	Höherer Rauschanteil des Messsignals
Spannungssensor	Ausfall Messsignal
	Messwertdrift
Temperatursensor	Ausfall Messsignal
	Messwertabweichung
	Abweichung Nullpunktlage
Drucksensor	Ausfall Messsignal
Membranwegsensor	Ausfall Messsignal
	Messwertabweichung
Raddrehzahlsensor	Ausfall Messsignal
	Messwertabweichung
	Höherer Rauschanteil des Messsignals
Rotorpositionssensor	Ausfall Messsignal
	Messwertabweichungen
	Höherer Rauschanteil des Messsignals
Fahr dynamiksensor	Ausfall Messsignal
	Abweichung Nullpunktlage
	Höherer Rauschanteil des Messsignals
	Verringerte Auflösung des Messsignals
Pedalsensor	Ausfall Messsignal
	Messwertabweichung
Schalter/Taster	Ausfall Messsignal
	Falsches Signal
Airbagsensor	Ausfall Messsignal
	Schwellwertdrift

Tab. 3: Übersicht der Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der Sensoren

3.2.2 Auswirkungen auf die Aktorik

Hochvoltschütze

Die Hochvolt-Schützschialtung wurde bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Schütze dienen allgemein dem Zu- und Abschalten großer Leistungen.

Aufbau und Funktionsweise

Schütze sind ähnlich aufgebaut wie Relais und schließen bzw. öffnen über einen mechanischen Kontakt den leistungsführenden Kreis. Der mechanische Kontakt wird über einen Magnetkreis betätigt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Schütze sind robust aufgebaut. Müssen sie allerdings große Ströme schalten, kommt es vor allem beim Trennen zu erhöhter Kontaktkorrosion infolge von Lichtbögen. Dies kann zum einen zu Kontaktabbrand, aber auch zum Verschweißen der Kontakte führen.

Batterie Hauptschalter

Der Batterie Hauptschalter, auch Service Disconnect genannt, dient dem dauerhaften Trennen der HV-Batterie vom HV-Bordnetz zu Reparatur- und Servicezwecken.

Aufbau und Funktionsweise

Der Batterie Hauptschalter kann als Steckbrücke mit integrierter Sicherung oder als mechanischer Schalter ausgeführt sein. Im Falle einer Steckbrücke wird über einen Hebelmechanismus der Steckkontakt des Batterie Hauptschalters freigelegt. Hierdurch wird – soweit vorhanden – die Sicherheitslinie unterbrochen.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch die abgeschlossene Einheit des Batterie Hauptschalters ist dieser sehr robust gegenüber Beschädigungen und Verschleiß. Außerdem kommt dieser recht selten zum Einsatz, sodass Verschleiß im Allgemeinen keine Rolle spielt. Einzig Kontaktkorrosion kann durch erhöhte Übergangswiderstände und die großen Ströme zum Verschweißen der Kontakte führen, was ein zerstörungsfreies Entfernen bzw. Schalten unmöglich macht.

Sicherheitslinienunterbrecher

Der Sicherheitslinienunterbrecher bildet den Kontakt an Steckern und Gehäusepunkten, der beim Öffnen getrennt wird und somit das Trennen der Hochvoltschütze auslöst.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da es sich um einen einfachen Stecker handelt, hält sich der Verschleiß bei diesem Bauteil in Grenzen. Durch mechanische Beschädigung oder Kontaktkorrosion wird in der Sicherheitslinie eine dauerhafte Unterbrechung sensiert.

Spannungswandler

Spannungswandler werden bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang für das Betreiben der Antriebsmotoren, die Versorgung des 12-V-Bordnetzes sowie das Laden des Energiespeichers benötigt.

Aufbau und Funktionsweise

Während des Ladevorgangs wird die für den Fahrbetrieb notwendige Energie von der speisenden Quelle in die Fahrzeugbatterie transportiert und gespeichert. Abhängig von der Art der Ladespannung wird zwischen AC- und DC-Ladung unterschieden (HOFH 2011). Bei der AC-Ladung führen die Ladekabel eine Wechselspannung, die erst im Fahrzeug gleichgerichtet und an die Batteriespannung angepasst wird. Hingegen wird bei der DC-Ladung durch die Ladekabel eine konstante Gleichspannung zum Fahrzeug geführt, die lediglich an die Batteriespannung anzupassen ist. Hierzu werden Schaltnetzteile eingesetzt, die prinzipiell wie folgt aufgebaut sind:

Zunächst wird die anliegende Wechselspannung gleichgerichtet (nur bei AC-Ladung erforderlich),

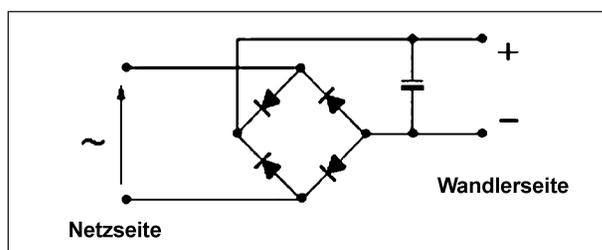


Bild 8: Schaltung eines einfachen Gleichrichters (B2-Schaltung) (HÜBN 2013)

anschließend in eine Wechselspannung mit wesentlich höherer Frequenz (typisch 50 bis 100 kHz) umgewandelt – um die Transformation durchführen zu können – und abschließend wieder gleichgerichtet. Der Aufbau ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Auf der Netzseite wird die einphasige 230-V- beziehungsweise dreiphasige 400-V-Netzspannung in Gleichspannung umgewandelt. Der dabei fließende Strom wird auf der Wandlerseite begrenzt.

Um die gleichgerichtete Netzspannung an die Spannung des Hochvoltbordnetzes des Fahrzeugs anzupassen, ist ein Gleichspannungswandler erforderlich. Gleichspannungswandler werden in Linearregler sowie Schaltregler unterteilt. Da Linearregler einen sehr schlechten Wirkungsgrad aufweisen, werden nur Schaltregler eingesetzt. Diese können primär oder sekundär getaktet werden. Als sekundär getaktete Schaltregler können der Aufwärts- und Abwärtsregler eingesetzt werden. Der prinzipielle Aufbau dieser beiden Schaltregler ist vergleichbar und wird in Bild 9 gezeigt.

Als Energiespeicher kommt eine Spule zum Einsatz, und der Leistungsschalter (S) erzeugt eine Rechteckspannung. Beim Aufwärtsregler wird während der leitenden Phase des Leistungsschalters die Spule aufgeladen, und diese Energie wird während der Sperrphase des Leistungsschalters an den Ausgangskondensator übertragen. Somit steigt die Ausgangsspannung mit steigendem Tastverhältnis (Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit).

Beim Abwärtsregler fließt während der leitenden Phase der Strom durch die Spule zum Ausgang, wodurch über der Diode (D) die Eingangsspannung anliegt. In der sperrenden Phase übernimmt die Diode den Strom der Spule, wodurch die Spannung über der Diode zu annähernd Null wird. Somit wechselt die Spannung über der Diode entsprechend dem Tastverhältnis zwischen Eingangsspannung und null. Die Ausgangsspannung wird durch den Tiefpass (Spule und Kondensator) geglättet und entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Diodenspannung.

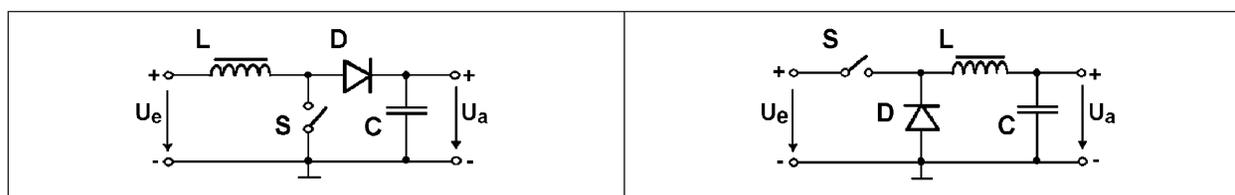


Bild 9: Prinzipieller Aufbau Aufwärtsregler (li) und Abwärtsregler (re) (HÜBN 2013)

Von den primär getakteten Schaltreglern wird aufgrund der großen Leistung der Durchflusswandler vorrangig eingesetzt. Aber auch der Einsatz von Sperr- sowie Gegentaktwandler ist möglich. Der prinzipielle Aufbau des Durchflusswandlers ist in Bild 10 dargestellt.

Die Funktion des Durchflusswandlers ist ähnlich der des Abwärtswandlers. Ist der Leistungsschalter leitend, liegt über der Diode D_3 die mit dem Transformatorübersetzungsverhältnis multiplizierte Eingangsspannung an. Während der Sperrphase ist die Diode D_3 leitend, sodass über ihr keine Spannung anliegt. Somit ist auch hier die Ausgangsspannung der arithmetische Mittelwert der Diodenspannung.

Die Steuerelektronik misst die Zwischenkreisspannung und steuert die Leistungsschalter geeignet an. Das Ladegerät kommuniziert mit dem BMS, das den Anschluss zur Batterie frei gibt.

Unabhängig von der Art des Ladevorganges müssen alle leistungsführenden Leitungen durch Leitungsschutzschalter oder Schmelzsicherungen gesichert werden.

Ein weiterer Gleichspannungswandler muss eingesetzt werden, um aus der Hochvoltspannung der Batterie die konventionelle Niedervolt-Bordspannung von 12 V zu erzeugen, um die 12-V-Verbrau-

cher wie das Radio, die Lichtanlage etc. mit Energie zu versorgen. Hier kann nur ein primär getakteter Schaltregler eingesetzt werden, da nur durch Einsatz dieser Schaltreglertopologien die Forderung der galvanischen Entkopplung zwischen Hochvolt- und 12-V-Bordnetz umgesetzt werden kann.

Ist der Elektromotor des Fahrzeuges eine Drehstrommaschine, wird ein Wechselrichter benötigt, der aus der Gleichspannung der HV-Batterie eine dreiphasige Wechselspannung erzeugt. Der Wechselrichter gibt die Stromstärke, die Phasenlage und die Frequenz der Wechselspannung vor und bestimmt somit die Rotationsgeschwindigkeit und das Drehmoment der E-Maschine. Als Wechselrichter wird vorrangig die gesteuerte 6-Puls-Brückenschaltung eingesetzt, deren prinzipiellen Aufbau Bild 11 zeigt.

Als Leistungsschalter werden, je nach Spannungslage, Leistungstransistoren (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) oder Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) oder Thyristoren (Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT)) eingesetzt. Durch die Ansteuerung werden die einzelnen Motorphasen (L_1 , L_2 , L_3) sinusförmig bestromt (SCHR 2008). Hierzu wird die Periodendauer der Ausgangsspannung in sechs Abschnitte unterteilt. In jedem Abschnitt müssen eine Motorphase mit der Eingangsspannung, eine andere

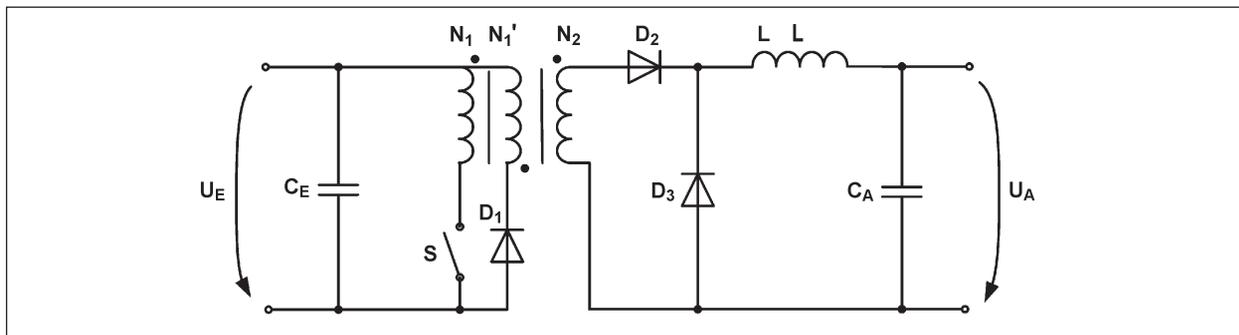


Bild 10: Prinzipieller Aufbau Durchflusswandler

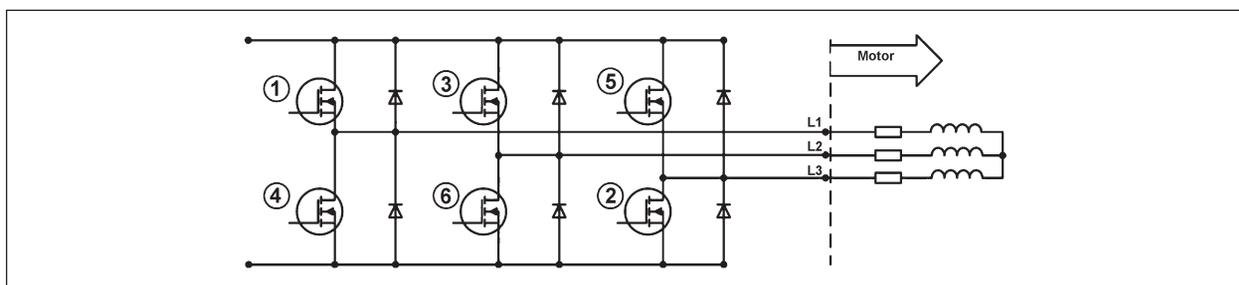


Bild 11: Prinzipieller Aufbau Wechselrichter (HÜBN 2013)

mit Masse und die dritte entweder mit Masse oder der Eingangsspannung verbunden sein. Dabei dürfen nie zwei Leistungsschalter eines Zweiges (z. B. T1 und T2) gleichzeitig geschlossen werden, da dies zu einem Kurzschluss führen würde. Die parallel zu den Halbleitern angeordneten Dioden übernehmen während des Abschaltvorgangs die durch die Spulen induzierten Ströme. Jedem der Leistungsschalter ist eine Sicherung zugeordnet, um im Fehlerfall den dauerhaft durchlässigen Leistungsschalter herauszutrennen. Für die Steuerung des Wechselrichters ist ein eigenes Steuergerät zuständig, das die einzelnen Leistungshalbleiter ansteuert. Dieses Steuergerät benötigt für die Motorregelung die von Sensoren bestimmten Angaben zu Rotorposition und Drehzahl, Motorstrom sowie das Wunschkmoment, das vom Fahrer mit der Fahrpedalposition eingestellt wird.

Wird eine Gleichstrommaschine eingesetzt, übernimmt ihre Steuerung ein Gleichspannungswandler mit eigenem Steuergerät.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Spannungswandler bestehen aus aktiven und passiven Bauelementen, die große Ströme schalten oder leiten müssen. Somit werden die Alterungserscheinungen entsprechend begünstigt. Alle Spannungswandler verfügen über einen Elektrolytkondensator sowohl am Ein- als auch am Ausgang. Hier besteht die Gefahr einer erhöhten Spannungswelligkeit oder eines Kurzschlusses am Ein- und Ausgang.

Kommt es zu einer Unterbrechung bei einer Diode der Gleichrichterschaltung, liegen am Ausgang nur noch eine Halbwelle der Eingangsspannung und somit die halbe Spannung an. Dieses Verhalten ist auch beim Kurzschluss einer Diode gegeben, jedoch wird die zweite Diode der Brücke überlastet und fällt aus. Der Ausfall der zweiten Diode kann bedeuten, dass diese ebenfalls dauerhaft leitend wird. Das führt zu einem Kurzschluss des Eingangs, oder es kommt zu einer Unterbrechung – und es liegt nur noch eine Halbwelle der Eingangsspannung am Ausgang an.

Bei den Schaltreglern kann es durch Alterung, Verschleiß oder Beschädigung der Bauelemente zum Ausfall oder einem Kurzschluss an der Ein- oder Ausgangsseite kommen. Der besonders kritische Fall des Kurzschlusses zwischen Ein- und Ausgang kann aufgrund der fehlenden galvanischen Ent-

kopplung nur bei den sekundär getakteten Schaltreglern auftreten.

Bei den Wechselrichtern ist durch die Absicherung jedes einzelnen Leistungsschalters lediglich ein Ausfall einer Phase zu erwarten.

Traktions-Elektromaschine

Die Elektromaschine dient dem Bereitstellen des Antriebsmomentes bzw. auch der Umwandlung von Bewegungsenergie in elektrische Energie (Rekuperation).

Aufbau und Funktionsweise

Die Elektromaschine nebst ihrer Bauteile wurden in Kapitel 2.2.2 bereits beschrieben.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

In ihrem Aufbau ist die Elektromaschine sehr robust konstruiert. Alterung und Verschleiß betreffen meist nur die Lagerung der Antriebswelle, also des Rotors. Die Erzeugung des Antriebs- und Rekuperationsmoments hängt maßgeblich von den leitenden Komponenten ab, hier vor allem von den Wicklungen und den Anschlüssen an dem zugehörigen Spannungswandler. Beeinträchtigungen von den Spulen (Wicklungskurzschlüsse, Hitzeeinwirkung auf die Induktivität) können sich negativ auf die Leistungsumsetzung auswirken. Auch kann eine überhöhte Temperatur die Permanentmagnete einer PMSM negativ beeinträchtigen (Entmagnetisierung). Eine Leistungsreduktion ist durchaus möglich.

Kompressoraggregat

Das Kompressoraggregat ist in Kraftomnibussen und Nutzfahrzeugen über 3,5 t primär für die Druckluft erzeugung zuständig.

Aufbau und Funktionsweise

Der Kompressor der Druckluftanlage verdichtet die Umgebungsluft, die anschließend in Zwischenspeichern aufbewahrt wird. Im Bremsfall öffnet das zuständige Pneumatikventil, und üblicherweise wird ein Membranzylinder mit der gespeicherten Druckluft beaufschlagt, der die Reibbremse betätigt. Der Kompressor wird im konventionellen Fahrzeug über den Verbrennungsmotor angetrieben. In elektrifizierten Antriebssträngen übernimmt dies jedoch ein

zusätzlicher Elektromotor. Die Verteilung des Druckes übernehmen Druckregleinheiten.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Der größte Belastungsfaktor des Systems ist der hohe Systemdruck und die damit verbundenen hohen Temperaturen. Dies belastet vor allem die Verbindungselemente. Durch die Beanspruchung kann es im System zu Undichtigkeiten kommen, die den Kompressor in einen höheren Lastpunkt versetzen und damit die Temperaturbelastung weiter in die Höhe treibt. Hierdurch kommt es zu einer starken Erwärmung des Elektromotors und zu einer starken Belastung des Isolationslacks der Wicklungen. Zudem verringert dies den Wirkungsgrad des Systems. Da das Arbeitsmedium Luft nicht leitfähig ist, geht vom Druckluftsystem eine zu vernachlässigende Gefahr von Kurzschlüssen aus.

Klimakompressor

Der Klimakompressor hat die Aufgabe, das Kältemittel so zu verdichten dass es flüssig wird. Das Kältemittel sollte hierbei einen relativ zu Wasser tieferen Siedepunkt haben.

Aufbau und Funktionsweise

Das vom Kompressor zuvor verdichtete flüssige Kältemittel wird zum zu kühlenden Ort geleitet und nimmt durch Überschreiten des Siedepunktes Wärmeenergie auf. Klimakompressoren sind meist als Axialkolbenverdichter ausgelegt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch die vielen bewegten Teile herrscht ein erhöhter Verschleiß im Kompressor. Bei ungenügender Schmierung kann dies zu verschlechtertem Wirkungsgrad bis hin zum Ausfall führen. Auch der erhöhte Druck im Kompressor belastet die Bauteile und Verbindungsstücke. Das Betriebsmittel ist meist hygroskopisch und zieht Wasser an. Dadurch kann es zu erhöhter Korrosion im Kompressor kommen, und der Wirkungsgrad des Kältemittels verringert sich. Undichtigkeiten am Kompressor können Kurzschlüsse auslösen bzw. die Funktionalität durch Druckminderung herabsetzen.

Heizaggregat

Das Heizaggregat dient der Erwärmung der Innenraumtemperatur im Fahrzeug (siehe Hochvoltheitung Kapitel 2.2.6).

Aufbau und Funktionsweise

Das Heizaggregat im konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor bezieht seine Wärme aus dem Kühlkreislauf des Motors. So wird auch bei manchen Ausführungen von Hybridfahrzeugen (z. B. Toyota Prius) die abgeführte Motorwärme des VM über einen Wärmetauscher an die zuzuführende Luft für den Innenraum abgegeben. Bei vollelektrischen Fahrzeugen ist die Abwärme der Elektromaschine bei kalten Außentemperaturen nicht ausreichend für die Innenraumbeheizung. Daher gibt es einen separaten Heizkreislauf, der über einen Heizwiderstand Kühlmittel erhitzt. Dieses wird an einen Wärmetauscher geleitet, der die Wärme an die Innenraumluft abgibt. Bei einer anderen Variante wird über ein Peltierelement Wärme erzeugt und direkt über ein Gebläse an die Innenraumluft abgegeben.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die Alterungserscheinungen treten im Heizaggregat primär im Heizwiderstand/Peltierelement und den Kontakten auf. Durch Korrosion können die Isolierung des Heizwiderstandes sowie die Kontakte in Mitleidenschaft gezogen werden. Vor allem bei Benutzung von flüssigen Betriebsmitteln besteht die Gefahr eines Kurzschlusses.

Kühlwasserpumpe

Die Kühlwasserpumpe fördert das Kühlmittel im Flüssigkeitskühlkreislauf.

Aufbau und Funktionsweise

Sie ist meist als Radialpumpe ausgeführt, die über eine Rotationsbewegung das in der Mitte eintretende Kühlmittel über Lamellen nach außen schleudert. Das Kühlmittel tritt tangential aus (HUPP 2012).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Generell ist das Kühlmittel deionisiert ausgelegt und ist damit hygroskop. Korrosion kann also nicht ausgeschlossen werden. Vor allem ist die Lagerung der bewegten Teile betroffen, ebenso ist der Ausfall der antreibenden Elektromaschine möglich.

Lüfter

Lüfter fördern die Umgebungsluft durch einen Wärmetauscher oder direkt an das zu kühlende Sys-

tem. Sie finden Anwendung als Motor-, Kühler- oder Batterielüfter

Aufbau und Funktionsweise

Lüfter bestehen aus einer Gleichstrommaschine, die ein Flügelrad antreibt. Es werden sowohl Gleichstrommaschinen mit mechanischer als auch elektrischer Kommutierung eingesetzt, deren Aufbau und Funktionsweise bereits in Kapitel 2.2.2 erläutert wurden.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die Wicklungen weisen die im Kapitel 3.1 aufgeführten Alterungserscheinungen von Induktivitäten auf. Daraus lässt sich ableiten, dass durch Verringerung der Induktivität der Wicklungen auch das maximale Motormoment fällt und somit die maximale Kühlleistung nicht mehr gegeben ist. Die Kontaktstellen können durch Beschädigung oder Wärme verspröden und abreißen. Des Weiteren werden durch Staub eine mechanische Beanspruchung sowie Verschleiß der Gleitlager hervorgerufen. Dies kann neben der Erhöhung des Geräuschpegels zum Ausfall des Lüfters führen.

Bei mechanisch kommutierten Gleichstrommaschinen verschleifen zusätzlich die Kohlebürsten, was zu einem Kontaktverlust führt. Die elektrisch kommutierte Gleichstrommaschine ist hingegen verschleißfrei und weist zusätzlich lediglich Alterungserscheinungen in der Ansteuerschaltung auf (BEHR 2012).

Hydroaggregat

Das Hydroaggregat ist im hydraulischen Bremskreis hinter dem Bremskraftverstärker verbaut und regelt die Druckverteilung an den vier Radbremsen. Es ist zum einen für die Umsetzung der Steuerbefehle des ABS sowie ESP verantwortlich und produziert zum anderen bei elektrohydraulischen Bremssystemen den Bremsdruck.

Aufbau und Wirkungsweise

Das Hydroaggregat verbindet den Hauptbremszylinder mit den Radzylindern. Über Magnetventile sind hydraulische Bypässe verlegt, die im Falle einer Bremsdruckregelung den vom Bremspedal ausgehenden Bremsdruck vergrößern oder verringern können. Für den Ab- und Aufbau des Hydraulikdruckes während des Bremseingriffes ist eine

Hydraulikpumpe zuständig (meist eine Zahnradpumpe, angetrieben durch einen Elektromotor). Zum Ausgleich der variierenden Flüssigkeitsvolumina werden Dämpferkammern, Federdruckspeicher oder Bremsflüssigkeitsspeicher eingesetzt (HEIS 2011).

In einem elektrohydraulischen Bremssystem ist über ein Ventil der Hauptbremszylinder vom Bremshydraulikkreis entkoppelt. Ein zusätzlicher Druckspeicher stellt den erforderlichen Hydraulikdruck für die Bremsen bereit.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung:

Primäre Fehler in Hydroaggregaten sind Undichtigkeiten, die zu einem Verlust des Bremsdrucks führen können. Vor allem Verbindungsstücke sind davon betroffen. Ebenso kann durch den Ausfall der Pumpe oder der Magnetventile das elektrohydraulische Bremssystem nicht mehr korrekt arbeiten. Die Sperrventile schalten bei Ausfall selbsttätig (mechanisch) in einen sicheren Zustand, der die direkte Hydraulikverbindung von Hauptbremszylinder und Radbremszylindern sicherstellt.

Bremskraftsimulator

Der hydraulische Hubsimulator wird bei elektrohydraulischen Bremssystemen eingesetzt. Er erzeugt bei der Betätigung des Bremspedals einen künstlichen Gegendruck, sodass der Fahrer einen konventionellen Bremsgegendruck verspürt.

Aufbau und Funktionsweise

Durch Magnetventile wird der Bremshydraulikkreis vom Hauptbremszylinder entkoppelt, und das Hubkraftsimulatorabschaltventil schaltet einen Federkraftspeicher hinzu, der dem Pedaldruck entgegenwirkt. Somit wird eine Widerstandskraft am Pedal erzeugt, die dem gewohnten Pedalgefühl nachempfunden ist. Bei Ausfall des Systems schalten sich die Sperrventile automatisch (mechanische Rückführung) in den geöffneten Betrieb, und das Hubkraftsimulatorabschaltventil wird geschlossen. Somit besteht wieder eine direkte Verbindung zwischen Hauptbremszylinder und Radbremszylindern (AISI 2013).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Der Hubsimulator kann durch Beschädigung (schräge Krafteinwirkung, Leckage, Materialermü-

dung) undicht werden. Ebenfalls kann es zu Ermüdungserscheinungen der Feder des Federkraftspeichers kommen.

Aktor	Auswirkung Alterung/ Verschleiß/Beschädigung
Hochvoltschütze	Dauerhaft unterbrochen
	Dauerhaft geschlossen
Batterie Hauptschalter	Dauerhaft unterbrochen
Sicherheitslinienunterbrecher	Sensiert dauerhafte Unterbrechung Sicherheitslinie
	Steuereinheit ausgefallen
Spannungswandler	Dauerhaft unterbrochen
	Ein- und Ausgang verbunden (nur sekundär getaktete Schaltregler)
	Kurzschluss am Eingang
	Kurzschluss am Ausgang
Traktions-Elektromaschine	Geforderte Ausgangsspannung kann nicht mehr erzeugt werden
	Verringerte Leistung
	Ausfall
	Kurzschluss
Kompressoraggregat	Ausfall
	Kurzschluss
	Wirkungsgradminderung
Klimakompressor	Ausfall
	Kurzschluss
	Wirkungsgradminderung
Heizaggregat	Ausfall
	Kurzschluss
Kühlwasserpumpe	Ausfall
	Kurzschluss
	Undichtigkeit
Lüfter	Verringerter Luftstrom
	Ausfall
	Kurzschluss
Hydroaggregat	Ausfall elektrohydraulisches Bremssystem
	Undichtigkeit
Bremskraftsimulator	Ausfall
	Undichtigkeit
Batterieunterbrecher	Ohne

Tab. 4: Übersicht der Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der Aktoren

Batterieunterbrecher

Der Batterieunterbrecher besteht aus einer pyrotechnischen Sicherung, die im Gefahrenfall einen Batteriepol trennt und vom Airbagsteuergerät ausgelöst wird.

Aufbau und Funktionsweise

Die feste Verbindung eines Leiters wird per Sprengladung, die einen Keil vorstoßen lässt, getrennt. Dabei wird ein Airbaganzünder eingesetzt (versiegelter Glas-Metall-Zünder). Der Keil besteht aus Kunststoff und löscht damit alle Funken, die in der Kapsel entstehen. Die Trennung erfolgt viermal schneller als mit konventioneller Sicherheitstechnik (AUTO 2013).

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die für diese Batterieunterbrechung benötigte Energie wird von der Bordnetzatterie zur Verfügung gestellt. Die Zündereinheit ist explosionsicher ummantelt. Verschleiß oder Beschädigung sind auszuschließen.

Fazit

Die Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der Aktoren sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

3.2.3 Auswirkungen auf die Steuergeräte

Die Steuergeräte in Fahrzeugen sind prinzipiell gleich aufgebaut, sodass sie übergreifend betrachtet werden können. Steuergeräte bestehen aus den funktionalen Gruppen Spannungsversorgung, Analogeingänge, Digitaleingänge, Ausgänge, Kommunikationsschnittstellen und Recheneinheit (s. Bild 12).

Ausfälle von Steuergeräten beruhen häufig auf Undichtigkeiten und dem damit verbundenen Eintritt von Wasser. Bekannt sind auch Korrosionserscheinungen an den Steckern und dem damit verbundenen erhöhten Kontaktübergangswiderstand. Ebenso können die Auswirkungen von Alterung, Verschleiß oder Beschädigung auf die Bauelemente der funktionalen Gruppen zu einem Funktionsverlust führen.

Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung von Steuergeräten besteht aus integrierten Schaltkreisen und passiven

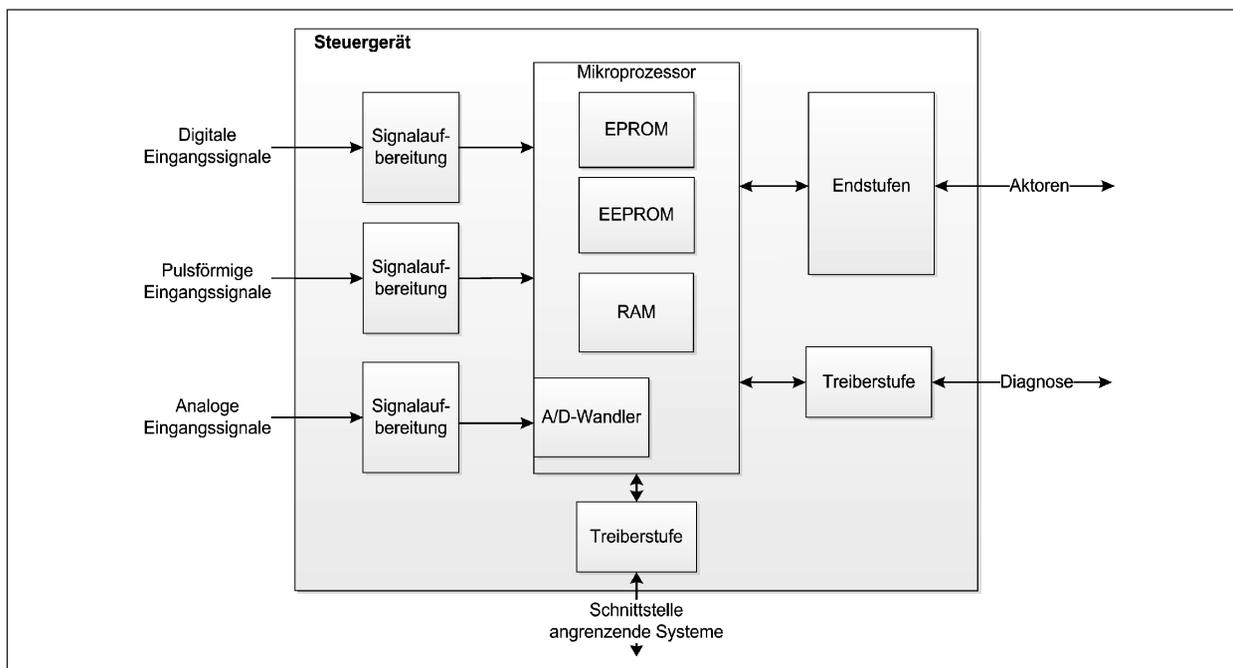


Bild 12: Prinzipieller Aufbau eines Steuergeräts

Bauelementen, die die 12-V-Bordnetzspannung in die intern benötigten Spannungen wandeln (typischerweise 5 V sowie 3,3 V). Hierbei wird die in Kapitel 2.2.3 beschriebene Topologie eines Abwärtswandlers verwendet. Außerdem müssen auftretende Spannungsspitzen gefiltert werden, um die Bauteile der Steuergeräte vor Überspannungen zu schützen. Dies wird durch Einsatz eines Tiefpassfilters sowie Suppressordioden oder spezieller Schutzschaltungen realisiert. Das Versagen eines dieser Bauteile kann zum Teilausfall bis hin zur Zerstörung des gesamten Steuergeräts führen.

Analogeingänge

Analoge Eingangssignale werden zunächst über einen Tiefpassfilter aufbereitet. Der Tiefpassfilter setzt sich aus einem Keramikcondensator und einem Widerstand zusammen, der je nach Beanspruchung altern oder beschädigt werden kann. Bei Kapazitätsrückgang oder Änderung des Widerstandes ergibt sich ein stärkeres Signalrauschen. Die Zunahme des Rauschens wirkt sich als Signaländerung aus und kann je nach Abtastrate zu Fehlinterpretation des zu messenden Signals führen. Das Auftreten eines Kurzschlusses oder einer Unterbrechung im Eingangsfiler hat zur Folge, dass das Signal stark rauscht oder elektrisch getrennt bzw. geerdet wird. Dann kann das Signal nicht mehr ausgewertet werden.

Digitaleingänge

Bei den Digitaleingängen besteht die Signalaufbereitung – wie auch bei den Analogeingängen – aus einem Tiefpassfilter. Hinzu kommt oft ein Schwellwertschalter, der die anliegenden Signalpegel in die von der Recheneinheit benötigten Signalpegel umwandelt. Für die Alterungs-, Beschädigungs- und Verschleißerscheinungen des Tiefpassfilters der Digitaleingänge sind die bei den Analogeingängen getroffenen Aussagen gültig. Der Schwellwertschalter besteht aus mehreren Halbleiterelementen sowie Widerständen. Aufgrund der geringen Belastung können diese allerdings als langzeitstabil angesehen werden.

Ausgänge

Zwischen der Recheneinheit und den Ausgängen der Steuergeräte sind Endstufen notwendig. Diese bestehen aus Widerständen und Halbleiterschalt-elementen. Exemplarisch ist der prinzipielle Aufbau einer Endstufe für ein Relais in Bild 13 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass eine Drift des Basisvorwiderstandswerts keine Auswirkung auf die Funktionalität der Endstufe besitzt. Er führt lediglich zu einer geringen Verschiebung des Transistorarbeitspunktes. Hingegen ist die Freilaufdiode (Diode über Primärwicklung des Relais) ebenso wichtig für die Funktionsweise wie der Transistor. Ist die Freilaufdiode dauerhaft leitend, kann die

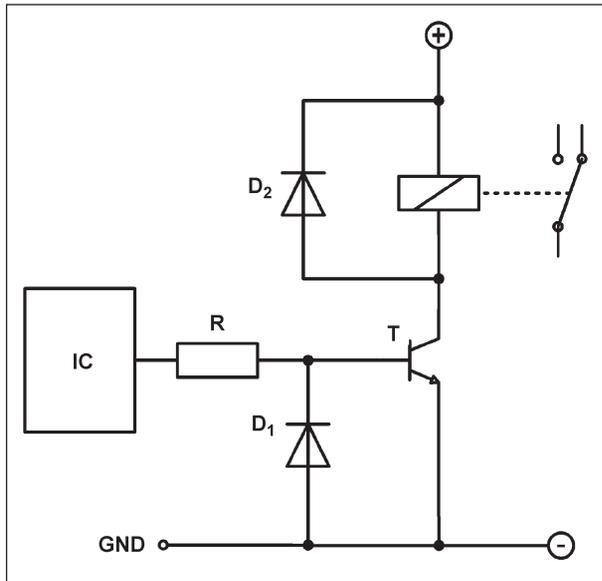


Bild 13: Prinzipieller Aufbau einer Endstufe

Primärwicklung des Relais nicht mehr bestromt werden und somit das Relais nicht mehr schalten. Kommt es zu einer Unterbrechung der Freilaufdiode, führt dies zur Überlastung und somit zur Zerstörung des Transistors. Bei defektem Transistor ist das Relais entweder dauerhaft ein- oder ausgeschaltet.

Da die Endstufen für andere Aktoren sich im Aufbau ähneln, sind die bei der Relaisendstufe getroffenen Aussagen übergreifend für alle Endstufen gültig.

Kommunikationsschnittstellen

Die Steuergeräte und teilweise auch Sensoren sowie Aktoren sind in modernen Fahrzeugen über Bussysteme miteinander vernetzt (z. B. CAN, LIN, MOST, FlexRay). Um den Informationsaustausch über den Datenbus zu gewährleisten, muss die Recheneinheit über Treiberstufen mit diesem verbunden werden. Die Treiberstufen sind in integrierten Schaltkreisen mit sehr wenig externem Beschaltungsaufwand ausgeführt. Durch Ausfall der Treiberstufe kann das Steuergerät keine Daten von anderen Steuergeräten bzw. busangebundenen Sensoren empfangen sowie keine busangebundenen Aktoren ansteuern. Somit ist es in seiner Funktion eingeschränkt.

Recheneinheit

Die Recheneinheit verarbeitet die aufbereiteten digitalen und analogen Signale der Eingänge und

Steuergerätekomponente	Auswirkung Alterung/ Verschleiß/Beschädigung
Spannungsversorgung	Teilausfall
	Komplettausfall
Analogeingang	Falsche Signalauswertung
	Ausfall
Digitaleingang	Falsche Signalauswertung
	Ausfall
Ausgang	Dauerhaftes Einschalten
	Dauerhaftes Ausschalten
Kommunikationsschnittstelle	Ausfall
Recheneinheit	Keine Speicherwerte

Tab. 5: Übersicht der Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen auf die Steuergerätekomponenten

steuert anhand dieser die angeschlossenen Aktoren. Die Verarbeitung verläuft nach einem für jedes Steuergerät spezifischen Programm, das im Festwertspeicher einprogrammiert wurde. Neben diesem Programm müssen auch ermittelte Werte gespeichert werden. Infolge von zu vielen Schreibzyklen dieser Speicherteile können diese ausfallen und es kann nicht mehr auf die gespeicherten Werte zugegriffen werden.

Fazit

Die Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der Komponenten der Steuergeräte sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

3.2.4 Auswirkungen auf sonstige Bauteile

Batteriezellen

Die HV-Batterie besteht aus einer Anzahl von in Reihe und parallel verschalteten Batteriezellen.

Aufbau und Funktionsweise

Zellen auf Lithium-Ionen-Basis haben meist eine Graphit-Anode und eine aus Lithium-Verbindungen bestehende Kathode. Zwischen beiden Elektroden liegt ein Elektrolyt, der durch einen Separator getrennt ist. Die elektrische Energie wird in Form von chemischen Verbindungen gespeichert. Durch Laden und Entladen werden chemische Prozesse eingeleitet.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Batteriezellen auf Lithium-Basis sind anfällig für eine Vielzahl von Einflüssen. Mit der zeitlichen Alterung nimmt unabhängig vom Gebrauch die Kapazität der Zellen ab. Dieser Prozess wird durch hohe Temperaturen noch beschleunigt. Durch hohe Zyklentiefe (große Schwankung des SOC) sinkt die Kapazität ebenso vermehrt. Ein weiteres Problem besteht in der Ladung bzw. Entladung der Zellen. Bei Tiefenentladung kann die Zelle beschädigt werden und verliert dann massiv an Kapazität. Zudem können sich innerhalb der Zelle Brücken ausbilden, die zu Kurzschlüssen führen und eine erhöhte Brandgefahr zur Folge haben können. Bei Überladung der Zellen kann es zu ungewollten chemischen Reaktionen kommen, die zu hoher thermischer Belastung bis hin zum Brand führen können.

Eine weitere Alterungserscheinung ist die Erhöhung des Innenwiderstandes der Zellen. Das hat eine Verringerung der Ausgangsspannung sowie einen größeren Wärmeeintrag in der Zelle zur Folge.

Durch mechanische Beschädigung kann es zum Austritt des Elektrolyten kommen, was einerseits eine akute Kurzschlussgefahr und andererseits eine thermische Reaktion mit Brandfolge bedeuten kann. Selbst ohne äußeren Anschein einer Beschädigung können intern bereits entsprechende Reaktionen durch die mechanische Beanspruchung verursacht worden sein.

Doppelschichtkondensatoren/Zwischenkreiskondensatoren

Für Doppelschichtkondensatoren und Zwischenkreiskondensatoren gelten die in Kapitel 3.1 dargestellten Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungsauswirkungen der Elektrolytkondensatoren.

Brennstoffzellen

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da auch in der Brennstoffzelle ein Elektrolyt verwendet wird, hat dieser enormen Einfluss auf die Alterung. Die abgegebene Leistung nimmt mit schwindendem Elektrolyt (Verdunstung) ab. Weiterhin nimmt der Reihenwiderstand der Zelle mit erhöhter Kontaktkorrosion zu und reduziert die abgreifbare Spannung. Da viel mit entflammaren und flüssigen Stoffen gearbeitet wird, führen Undichtig-

keiten vor allem zu gefährlichen Kurzschlüssen und Bränden.

Lüftungsgitter

Sie dienen im Lüftungskreislauf dem Filtern von Fremdmaterial von außen, sodass sich keine Fremdteilchen im Lüftungskreislauf festsetzen können.

Aufbau und Funktionsweise

Lüftungsgitter bestehen prinzipiell aus einfachem engmaschigen Draht oder Kunststoffgeflechten und schützen den Ein- und Ausgang eines Lüftungssystems vor Fremdmaterial.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da Lüftungsgitter aus robusten Materialien bestehen, ist Alterung im Allgemeinen kein Problem. Beschädigungen können hingegen durch Tiere oder mechanische Einwirkungen auftreten. Dies kann die Funktion des Lüftungsgitters einschränken oder außer Kraft setzen. Möglich ist auch, dass sich das Lüftungsgitter mit Feinmaterial zusetzt; dann ist die Luftzirkulation eingeschränkt. Im schlimmsten Fall könnte dies bei heißer Abluft und Hitzestau zum Brand führen. Feuchtigkeit kann unter Umständen die Korrosion des Gitters fördern und somit die Funktion einschränken.

Lüftungsschächte

Lüftungsschächte bilden die Verbindungsstücke im Lüftungskreislauf und führen die Zu- und Abluft.

Aufbau und Funktionsweise

Die Lüftungsschächte bestehen meist aus Kunststoff. Sie führen die angesaugte Luft an das zu kühlende System und sorgen nach erfolgtem Wärmeaustausch über Abluftkanäle für den Abtransport derselben.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Die Beanspruchung der Lüftungsschächte kann generell als gering betrachtet werden. Bei Verbauung der Kanäle nah an großer Wärme führenden Bauteilen (z. B. Verbrennungsmotor oder Abgasstrang) kann lokal ein großer Wärmeeintrag entstehen, der bei Kunststoff eine Beschädigung nach sich ziehen kann. Dieser Wärmeeintrag kann auch durch einen

Wärmestau hervorgerufen werden. Durch mechanische Beschädigungen oder Schläge/Vibrationen können eventuell Verbindungsstücke der Kanäle gelöst werden, was den Luftstrom unterbrechen und die Funktion einschränken oder außer Kraft setzen würde.

Kühlmittelschläuche

Kühlmittelschläuche transportieren das flüssige Kühlmittel in das zu kühlende System und von dort an den Wärmetauscher.

Aufbau und Funktionsweise

Die Kühlmittelschläuche bestehen meist aus elastischen Schläuchen, die gegebenenfalls armiert sind.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch Einwirkung von Hitze und Zeit können die elastischen Schläuche mit der Zeit porös werden und Leckagen aufweisen. Die Wicklungen der Armierung sind hingegen anfälliger gegen Feuchtigkeit, die die Korrosion begünstigt. Auch Tiere können durch Bisschäden für Leckagen an den Schläuchen sorgen. Darüber hinaus kann es durch Vibrationen und Schläge zum Lösen der Verbindungsstellen kommen.

Druckregleinheit

Die Druckregleinheit reguliert den Volumenstrom im Kältekreislauf einer Flüssigkeitskühlung und somit die Kühlleistung.

Aufbau und Funktionsweise

Über ein Druckregelventil reguliert die Einheit den Systemdruck im Kühlmittelkreislauf. Das Ventil ist meist als Magnetventil ausgelegt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Wie im Hydraulikkreis üblich sind Undichtigkeiten das Hauptproblem, die durch Korrosion der Verbindungsstücke am Ventil hervorgerufen werden können. Ebenso können mechanische Beschädigungen durch Schläge oder Vibrationen dazu führen. Weiterhin ist ein Ausfall des Magnetventils nicht ausgeschlossen. Ein Magnetventil wird über Elektromagneten betrieben. Die Spulen unterliegen den im Kapitel 3.1 beschriebenen Beanspruchungen.

Isolationswächter

Der Isolationswächter wurde bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da die Überwachungsfunktion des Isolationswächters auf einer Spannungsmessung basiert, ist ihre Fehlfunktion die Hauptfehlerquelle. Die Spannungsmessung wird über die Messung eines hochohmigen Widerstandes gegen Bezugs Erde durchgeführt. Auch dieser Widerstand unterliegt einer Drift, die allerdings der Identifizierung eines Isolationsfehlers nicht entgegensteht. Das größte Problem stellen Kontaktkorrosion und -verlust durch Vibrationen und Schläge dar.

Zusatzbatterie

Die Zusatzbatterie wurde bereits im Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch die Verwendung im Fahrzeug altert eine Bleisäurebatterie, und der Innenwiderstand erhöht sich mit der Zeit. Hierdurch sinkt die abgreifbare Klemmenspannung, und die Temperaturbelastung der Batterie nimmt zu. Allgemein trägt eine erhöhte Temperatur zur Alterung der Batterie bei. Über die Zeit verdunstet auch in bestimmtem Maße der Elektrolyt, was zu einer Verringerung der Kapazität führt. Durch Korrosion der Kontakte erhöht sich außerdem der Reihenwiderstand, und die abgreifbare Spannung sinkt weiter. Durch Beschädigungen am Gehäuse der Batterie kann es zum Austritt des Elektrolyten und somit zum einen zu akutem Kapazitätsverlust oder zum anderen zu Kurzschluss kommen.

Ladekabel

Das Ladekabel verbindet bei einem Elektro- bzw. Plug-in-Hybridfahrzeug den Energiespeicher des Fahrzeugs mit einer externen Spannungsquelle, damit die Fahrzeugbatterie geladen werden kann.

Aufbau und Funktionsweise

Das Ladekabel besteht generell aus einem mehradrigen isolierten Kupferleiter mit Steckkontakten an beiden Enden.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da das Fahrzeug sich während des Ladevorgangs im Ruhezustand befindet, ist das Kabel keinen großen Schlägen und Vibrationen ausgesetzt. Jedoch wird es meist im Außenbereich angewendet und ist somit zeitweise der Witterung ausgesetzt. Korrosion der Steckkontakte kann eine Folge sein. Zudem kann das Ladekabel aufgrund von Beschädigungen durch Tiere oder andere mechanische Einwirkungen die Isolierung oder den Kontakt einzelner Leiter verlieren. Außerdem kann die Isolierung durch Verwitterung porös und in Verbindung mit Feuchtigkeit unwirksam werden.

Hochvoltkabel

Die Hochvoltkabel dienen der Verbindung der einzelnen Hochvoltverbraucher mit dem Energiespeicher.

Aufbau und Funktionsweise

Im Aufbau ähneln die Hochvoltkabel dem Ladekabel. Sie sind allerdings zumeist einadrig ausgelegt. Hochvoltkabel sind isoliert (Farbe Orange) und geschirmt.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Auch hier entsprechen die Auswirkungen denen des Ladekabels. Zwar sind sie vor Witterung geschützt, dafür jedoch vermehrt von Vibration und Schlägen betroffen, was die Kontaktstellen belastet. Bei Beschädigung der Isolation kann es zu Kurzschlüssen mit Brandgefahr kommen.

Ladeanschluss

Der Ladeanschluss stellt den Steckverbinder zwischen Ladekabel und Energiespeicher des Fahrzeuges dar. Er beinhaltet zusätzlich einen Kontaktstatusschalter.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Als fahrzeugseitiger Steckverbinder ist er der Witterung ausgesetzt, wodurch die Kontaktkorrosion begünstigt wird. Des Weiteren können mechanische Schäden seine Kontaktierung beeinträchtigen. Ein Ausfall des Kontaktstatusschalters durch Korrosion oder mechanische Beanspruchungen ist ebenfalls nicht auszuschließen.

Sicherungen

Sicherungen dienen der Trennung des stromführenden Leiters im Fehlerfall. Konkret bedeutet das einen Überstrom oder Fehlerstrom durch Kurzschluss oder unbeabsichtigte Erdung.

Aufbau und Funktionsweise

Die einfachste Sicherung ist die Schmelzsicherung. Sie ist so aufgebaut, dass sie bei Überschreiten eines Grenzstromes den Kontakt aufschmilzt. Andere Sicherungen im Fahrzeug sind selbstrückstellend ausgelegt. Diese Kaltleiter erhöhen ihren Widerstand mit steigender Temperatur und verringern somit den Stromfluss, bis sie schließlich so hochohmig werden, dass nahezu die gesamte Systemspannung über ihnen abfällt. Durch Abkühlen verringert sich der Widerstand wieder, und der Strom kann dann erneut ansteigen.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da es sich meist um Widerstandssicherungen handelt, sind diese auch einer gewissen Drift über Alterung und Einwirkung von Temperatur unterworfen, was den Schwellwert ihres Auslösens leicht verschieben kann. Zudem lässt sich, wie bei allen kontaktierenden Elementen, der Kontaktübergangswiderstand durch Korrosion erhöhen.

Sicherheitslinie

Die Sicherheitslinie, auch Pilotlinie genannt, dient dem Abschalten des Hochvoltsystems beim manuellen Öffnen des HV-Kreises sowie von HV-Komponenten.

Aufbau und Funktionsweise

Sobald Gehäuse von Hochvoltkomponenten geöffnet oder HV-Stecker gezogen werden, ist der Kontakt der Sicherheitslinie unterbrochen. Dies löst das Öffnen der Hochvoltschütze aus. Das System der Sicherheitslinie besteht aus einem Stromkreis mit vielen Steckkontakten an den relevanten Gehäusepositionen der Hochvoltkomponenten sowie HV-Steckern.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Durch die verschiedenen Positionen im Fahrzeug, an denen die Sicherheitslinie verläuft, ist sie auch den unterschiedlichen Belastungen des Fahrzeu-

ges ausgesetzt. Dies sind vor allem hohe Temperaturen, Vibrationen/Schläge und Feuchtigkeit. Daher müssen die Steckkontakte besonders robust und korrosionssicher ausgelegt werden. Durch Beschädigung oder Korrosion kann der Kontakt unbeabsichtigt getrennt werden, wodurch der Sicherheitslinienunterbrecher umgehend aktiviert wird.

Wärmetauscher

Der Wärmetauscher sorgt für die Erwärmung der Innenraumluft des Fahrzeugs.

Aufbau und Funktionsweise

Durch einen elektrisch aufgeheizten Leiter wird die „Kühlflüssigkeit“ des Heizsystems aufgeheizt und gibt die Wärme durch die große Fläche des Kanalsystems an die umgebende Luft ab, die dann durch einen Lüfter in den Innenraum befördert wird.

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Der elektrische Widerstand ist für die Wärmeentwicklung vorgesehen und ist deshalb gegenüber hohen Temperaturen unempfindlich. Da das System jedoch mit Flüssigkeit in Kontakt steht, besteht eine erhöhte Gefahr von Kurzschlüssen im Falle von Leckagen.

Kombiinstrument

Das Kombiinstrument ist primär dafür verantwortlich, dem Fahrer Informationen über den Fahr- und Betriebszustand des Fahrzeugs zu geben. Dies betrifft vordergründig die Fahrzeuggeschwindigkeit, die verbleibende Energiereserve/Reichweite, Status der Fahrerassistenzsysteme und Informationen über Fehlfunktionen der Antriebskomponenten, sofern diese vom System selbst detektiert wurden.

Aufbau und Funktionsweise

Im Prinzip besteht das Kombiinstrument nur aus Anzeigeelementen mit den beschriebenen Anzeigefunktionen. Sie dienen der Informationsweitergabe, die das Instrument von anderen Steuergeräten des Antriebssystems erhält — vordergründig via CAN-Bus. Diese Informationen zeigt es in Form von Kontroll-/Warnleuchten, einem analog-mechanischen Anzeigeelement (z. B. Nadel und Ziffernscheibe) oder auf einem digitalen Display an.

Sonstiges Bauteil	Auswirkung Alterung/ Verschleiß/Beschädigung
Batteriezellen	Kurzschluss
	Unterbrechung
	Kapazitätsverlust
	Spannungseinbruch
	Erhöhte Erwärmung
	Brand
Doppelschichtkondensatoren/ Zwischenkreiskondensatoren	Kurzschluss
	Unterbrechung
	Kapazitätsverlust
	Gasbildung
Brennstoffzellen	Kurzschluss
	Unterbrechung
	Brand
Lüftungsschächte	Unterbrechung Luftstrom
	Verringerung Luftstrom
Lüftungsgitter	Filterwirkung versagt
	Verringerung Luftstrom
	Unterbrechung Luftstrom
Kühlmittelschläuche	Kühlmittelverlust
Druckregeleinheit	Kühlmittelverlust
	Dauerhaft geöffnet
	Dauerhaft geschlossen
Isolationswächter	Messwertabweichung
	Ausfall Messsignal
Zusatzbatterie	Spannungseinbruch
	Kapazitätsverlust
	Kurzschluss
Ladekabel	Verschweißen der Kontakte
	Isolationsverlust
	Kontaktunterbrechung
Hochvoltstecker	Verschweißen der Kontakte
	Kontaktverlust
Hochvoltkabel	Isolationsverlust
	Schirmungsverlust
Ladeanschluss	Verschweißen der Kontakte
	Kontaktverlust
	Falscher Ladesteckerstatus
Sicherungen	Drift des Auslösekennwertes
	Dauerhafte Unterbrechung
Sicherheitslinie	Unbeabsichtigtes Abschalten des HV-Systems
Wärmetauscher	Funktionsverlust aufgrund von Leckage
	Verminderte Funktion wegen Verstopfung Waben
Kombiinstrument	Ausgabe Fehlinformationen

Tab. 6: Übersicht der Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungserscheinungen der sonstigen Bauteile

Alterung/Verschleiß/Beschädigung

Da das Kombiinstrument in keiner unmittelbaren Nähe zum Antrieb steht, selbst keine hohe Leistungen führt oder schaltet und vor Witterung geschützt ist, wird es nur geringen Belastungen ausgesetzt. Diese könnten Vibrationen oder Temperaturen infolge von Sonneneinstrahlung sein. Vor Feuchtigkeit ist das Kombiinstrument weitestgehend geschützt. Dennoch kann es auch hier zu Kontaktkorrosion oder Fehlverhalten in der CAN-Kommunikation kommen. Dadurch können die Anzeigen fehlerhaft sein oder ausfallen, was im Falle von kritischen Fehleranzeigen sicherheitskritisch sein kann. Ebenso kann aufgrund einer defekten Energiespeicheranzeige das Fahrzeug während der Fahrt plötzlich liegen bleiben.

Fazit

Die Alterungs-, Verschleiß- und Beschädigungsercheinungen der Komponenten der Steuergeräte sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

3.3 Betrachtung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem mit softwaregestützten Modelluntersuchungen

Aus AP1 sind die relevanten Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs bestimmt worden. Betrachtungen der Wechselwirkungen unter einzelnen Bauteilen sind mit ausreichenden Systemkenntnissen möglich. Die Systemeinflüsse einzelner Bauteile und Funktionen ergeben sich jedoch aus der Verkettung der verschiedenen Komponenten. Die Anzahl der hier relevanten Systemelemente führt bei dieser Betrachtung allerdings zu einer enormen Anzahl von zu untersuchenden Fehlerszenarien. Aus diesem Grund wurde zugunsten einer simulationstechnischen Untersuchung des Gesamtsystems entschieden, um der Komplexität der funktionalen Vernetzung aller Einzelelemente und den verschiedenen Abhängigkeiten untereinander Rechnung zu tragen.

3.3.1 Vorbetrachtungen

Für die Untersuchung der Einflüsse verschiedener Einzelbauteile und -funktionen wurden verschiedene Fehleranalysemethoden betrachtet. In der ISO 26262-9 zur funktionalen Sicherheit von technischen Systemen werden unterschiedliche Metho-

den für Qualitäts- und Sicherheitsverfahren vorgeschlagen (ISO 2011).

Die FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) ist ein induktives Analyseverfahren, das den Einfluss einzelner Ereignisse oder Funktionen in tiefer Systemebene auf umliegende Systemelemente untersucht. Es ist hierfür ein umfangreiches Systemwissen notwendig, damit für jedes relevante Element des Systems eine separate serielle Fehlerkette erstellt werden kann. Eine Bewertung der Fehlerszenarien erfolgt über die Risikoprioritätszahl, die ein Produkt aus Fehlereintrittswahrscheinlichkeit, Schweregrad der Folgen und einer Kennzahl für die Detektionswahrscheinlichkeit ist (DIN 2006).

Die Fehlerbaumanalyse (FTA) ist ein deduktives Verfahren, das ebenfalls ein detailliertes Systemwissen voraussetzt. Es werden Hauptereignisse (Fehlerzustände) formuliert und Ebene für Ebene Ursachen sowie Wahrscheinlichkeiten für deren Eintreten betrachtet. Diese Ursachen werden in Form von Zwischen- und Grundereignissen beschrieben, die dann über logische Verknüpfungen untereinander in Beziehung gesetzt werden (DIN 2007).

Als dritte Analysemethode wurde die Ereignisbaumanalyse (ETA) betrachtet. Sie ist wie die FMEA ein induktives Verfahren und geht von einem Grundereignis aus. Dieses Grundereignis spiegelt den Fehlerzustand eines Bauteiles oder einer Funktion wider. Dem Grundereignis folgen die direkt betroffenen Betrachtungseinheiten, die auf dieses unterschiedlich reagieren können (Erfolg oder Misserfolg, Ausfall oder weitere Betriebsfähigkeit etc.), und führt zu einer Verzweigung der Fehlerbetrachtungen. Jedem Zweig kann dabei für seine verschiedenen Einzeleintrittswahrscheinlichkeiten eine Gesamteintrittswahrscheinlichkeit berechnet werden. Auch für diese Analysemethode ist ein fundiertes Systemwissen Voraussetzung (DIN 1985).

Die FSD Fahrzeugsystemdaten GmbH, Dresden, verfügt bereits über ein Analyseprogramm auf Grundlage der FMEA. Es stellte sich jedoch heraus, dass die serielle Formulierung von Fehlerketten nicht allen Ansprüchen an die Untersuchung des Fehlerverhaltens des Gesamtsystems gerecht wird. Hervorzuheben ist hierbei die vermeintliche Unfähigkeit, Rückwirkungen bzw. Schleifen im System darzustellen. Zudem müssen Fehlerszenarien manuell vorgegeben werden.

Das Ausfallmodell des elektrischen Antriebsstrangs soll nach Möglichkeit ein verallgemeinertes Modell darstellen, das die verschiedenen Architekturen der derzeit in Umlauf befindlichen elektrisch betriebenen Fahrzeuge einbezieht. Daher ist es schwierig, für einzelne Bauteile und Funktionen Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Ausfallhäufigkeiten zu definieren, und nachteilig für alle betrachteten Analysemethoden. Deshalb wird sich die Bewertung der einzelnen Fehlerszenarien im Wesentlichen auf den Schweregrad der Folgen konzentrieren. Zur Fehleranalyse wurde schließlich eine Synopse der einzelnen Fehleranalyse-Methoden angestrebt, mit der sowohl eine flexible Betrachtung von Fehlerszenarien als auch eine Betrachtung des Gesamtsystems als Netzwerk gewährleistet werden konnten. Hierauf wird nachfolgend eingegangen.

3.3.2 Aufbau des Strukturmodells des elektrischen Antriebsstrangs

Alle drei Fehleranalysemethoden aus Kapitel 3.3.1 setzen ein Strukturmodell des technischen Systems voraus, an dem die Fehlerszenarien untersucht werden. Die Einzelelemente des Strukturmodells können in Form von Funktionen oder Bauteilen modelliert werden. Zweckmäßig im Sinne der Hauptuntersuchung wurde zugunsten der Darstellung in Form von Bauteilen entschieden. Die verwendeten Bauteile wurden aus der Zusammenstellung der relevanten Komponenten aus Kapitel 2.2 entnommen und zu einem funktionalen Netzwerk zusammengefügt. Einzelelemente haben als Eingangsvariablen e_x die Funktionsausgänge a_x der mit ihnen verbundenen Bauteile. Jeder Funktionsausgang modelliert eine Funktion, die das entsprechende Bauteil zu erfüllen hat. Die Eingangsvariablen sind wiederum notwendig, um den Status der eigenen Funktionen eines Bauteils zu bestimmen. Darüber hinaus werden im Gesamtmodell globale Einflussfaktoren definiert, die bauteilunabhängig Einfluss auf den Status der Ausgänge von unterschiedlichen Bauteilen haben, aber auch von diesen ausgelöst werden können. Beispiele für globale Einflussfaktoren g_x sind etwa Feuchtigkeit (ausgelöst zum Beispiel durch eine Leckage in einem Kühlschlauch) oder Kurzschluss im Versorgungsnetz. Um auch zeitverzögerte Auswirkungen abbilden zu können, die keinen unmittelbaren Einfluss auf das entsprechende Bauteil haben, besitzt jedes Bauteil den zugehörigen verzögerten Funktionsstatus v_x der Ausgangsvariablen. Sie modellieren erst über einen gewissen Zeitraum eintreffende Auswirkungen auf die Aus-

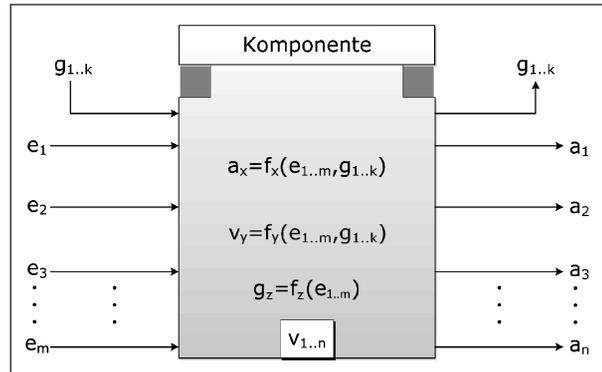


Bild 14: Schematische Darstellung einer Komponente im Strukturmodell des elektrischen Antriebsstrangs

gangsfunktionen eines Bauteils wie etwa die Einwirkung von Übertemperatur. Eine schematische Darstellung einer Komponente ist in Bild 14 gezeigt. Die Funktionen zur Darstellung der Statuswerte der Ausgangsvariablen bestehen aus Boolescher Algebra. Es werden also logische Verknüpfungen der Eingangsvariablen und globalen Einflussfaktoren für die Berechnung jeder einzelnen Ausgangsvariable (= Einzelfunktion der Komponente) erstellt.

Der Wertebereich der Variablen ist im einfachsten Fall mit „in Ordnung“ und „nicht in Ordnung“ $a_x, e_x, v_x, g_x \in \{0; 1\}$ definiert. Bei Vorüberlegungen hat sich jedoch ergeben, dass Fehlerzustände damit teilweise zu ungenau beschrieben werden. Der Wertebereich wurde deshalb auf die Menge „korrekte Funktion“, „Ausfall“, „Funktion oberhalb Wertebereich“ und „Funktion unterhalb Wertebereich“ erweitert. Auf diese Weise können Fehlfunktionen, die einen speziellen Fehlerzustand des Elementes darstellen, abgebildet werden. Dazu zählen etwa die Messwertedrift bei Sensoren, das fehlerhaft auftretende Rekuperationsmoment oder sogar der Kurzschluss von Schaltelementen. Die Anwendung des Wertebereiches auf eine Bauteilfunktion kann also individuell erfolgen; sie muss jedoch eindeutig im jeweiligen Bauteil formuliert werden, um Missverständnisse auszuschließen.

Wie bereits erwähnt, ist das Ausfallmodell des elektrischen Antriebsstrangs als funktionales Netzwerk seiner Komponenten aufgebaut. Somit kann der Fehlerzustand a_x jeder Funktion jeder Komponente betrachtet werden, ohne dass für jede Funktion eine eigene Fehlerkette manuell konstruiert werden muss. Bild 15 beschreibt den schematischen Aufbau eines einfachen Netzwerkes aus Komponenten. Die Fehlerzustände der einzelnen Komponentenfunktionen sind durch die Werte der Ausgangsvariablen a_x definiert.

Jedes Subsystem besteht seinerseits aus den einzelnen ihm zugewiesenen Bauteilen, die wiederum untereinander über Funktionen nach dem Schema aus Bild 14 und Bild 15 miteinander verbunden sind. Der Aufbau der einzelnen Subsysteme ist in den Bildern 17 bis 20 dargestellt.

Im Energiespeicher werden alle Komponenten abgebildet, die der grundlegenden Energieversorgung des elektrischen Antriebsstrangs dienen. Hierzu

zählen sowohl die Elemente des HV-Netzes als auch die des LV-Netzes.

Die Komponenten im Traktionssystem beschreiben diejenigen Elemente, die für den Antrieb des Fahrzeuges zuständig sind, also für die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie. Dies umfasst neben der Elektromaschine mit zugehörigem Wechselrichter, Sensoren usw. auch die Elemente der Bremse.

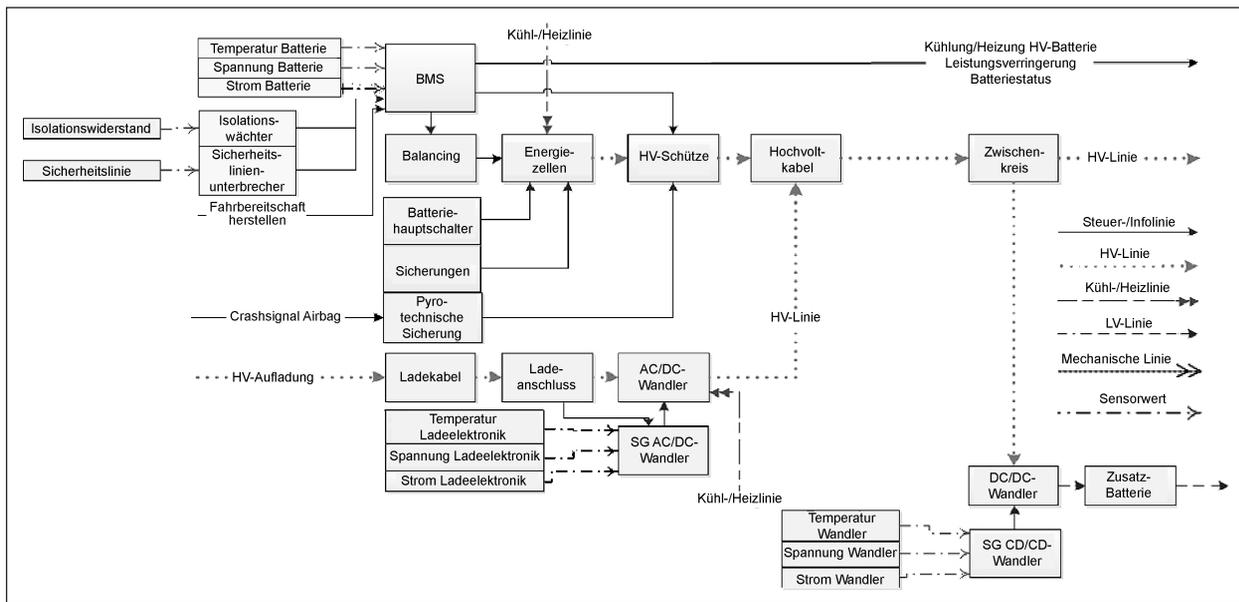


Bild 17: Funktionaler Aufbau des Subsystems Energiespeicher

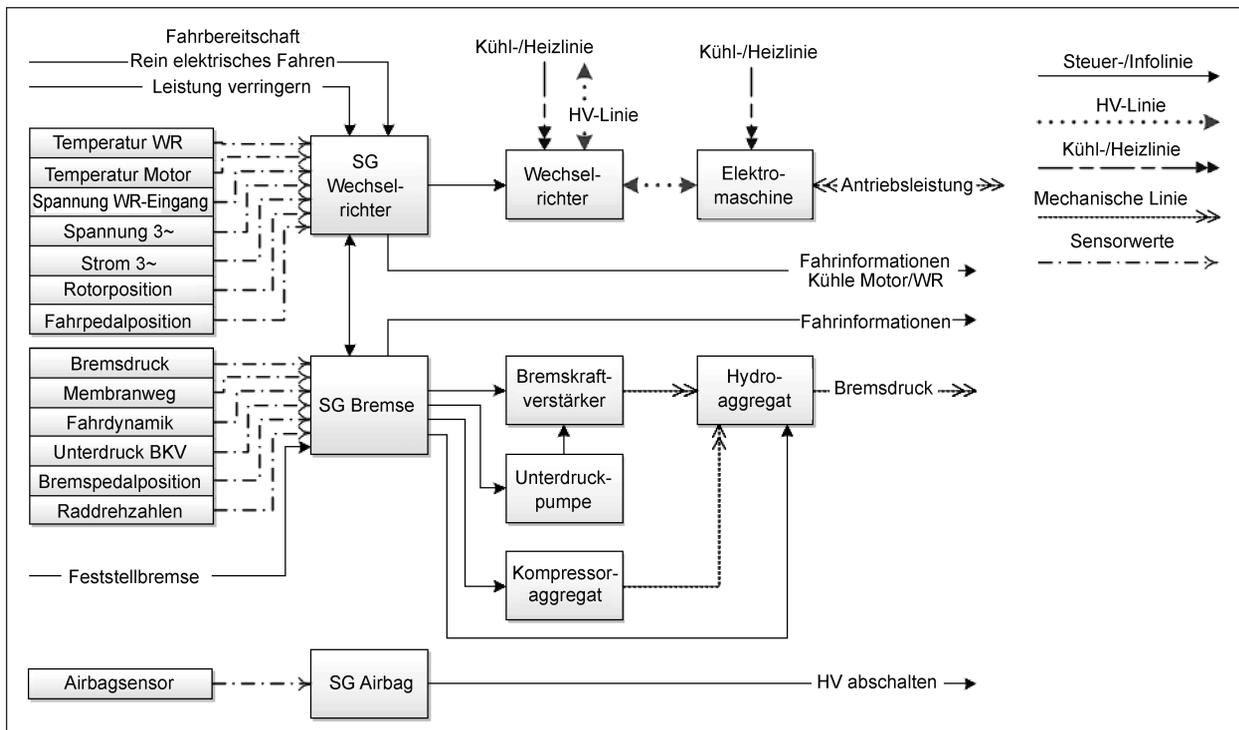


Bild 18: Funktionaler Aufbau des Subsystems Traktion

Das Kühlsystem beinhaltet die Komponenten, die für die Konditionierung des HV-Speichers zuständig sind, ebenso für die Kühlung der Antriebskomponenten und für Heizung und Kühlung des Fahrer-raums. Es besteht aus diversen Sensoren, Leitungselementen, dem HV-Klimakompressor, dem HV-Heizaggregat und weiteren Komponenten.

Im Subsystem HMI werden vor allem die Elemente abgebildet, die als Schnittstelle mit dem Gesamt-fahrzeug bzw. Fahrer dienen. Dies beinhaltet das Kombiinstrument bzw. die Steuertafel und den Fahrer- bzw. Fahrgastraum selbst.

3.3.3 Umsetzung des Ausfallmodells mit Matlab/Simulink und Auswertung der Simulationsergebnisse

Für die Umsetzung des Ausfallmodells des elektrischen Antriebsstrangs wurde die Software Matlab/Simulink verwendet. Jede Komponente ließ sich als separater Blockbaustein in Simulink mit den individuellen Logikverknüpfungen für die Ausgangsfunktionen erstellen. Auf diese Weise ist auch eine gegebenenfalls erforderliche Erweiterung um weitere Bauteile möglich, und das Strukturmodell ist übersichtlich darstellbar.

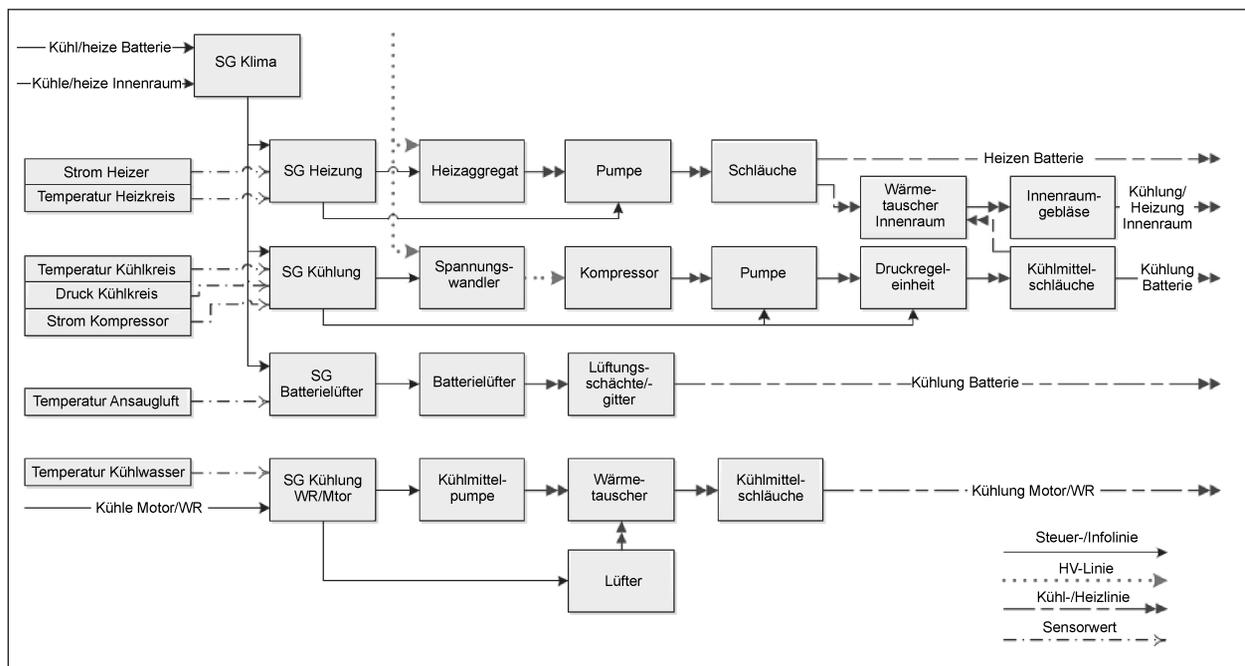


Bild 19: Funktionaler Aufbau des Subsystems Heizung/Kühlung

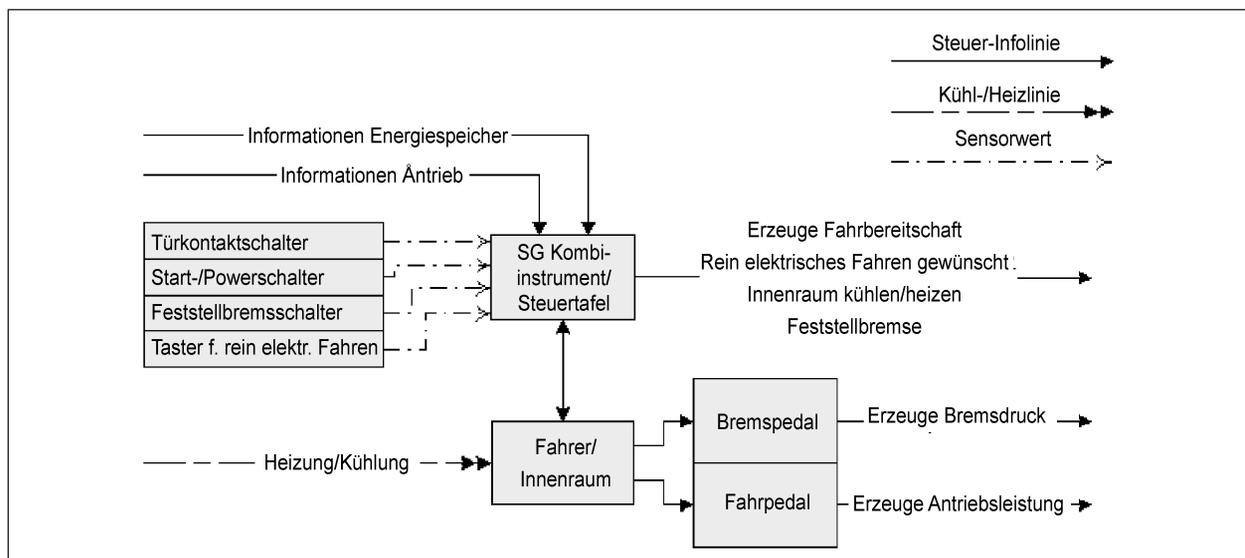


Bild 20: Funktionaler Aufbau des Subsystems HMI

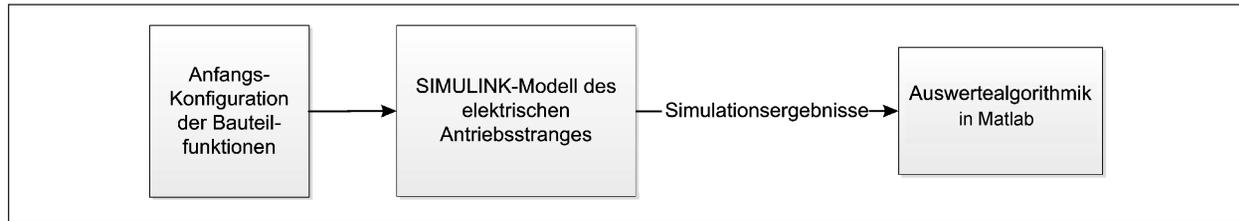


Bild 21: Ablauf Simulation eines Einzelereignisses

Für die Simulation des Gesamtmodells ist eine Parametrierung notwendig, die über ein Parameterobjekt in Matlab gegeben ist. Hier ist es möglich, jeder einzelnen Funktion des Simulink-Modells einen vordefinierten Fehlerzustand zuzuweisen. Nach Durchlauf des Modells in Simulink wird dann ein Datenobjekt zurückgegeben, das die Auswirkung der Initialparametrierung auf das Gesamtmodell widerspiegelt. In einem Auswerteskript werden alle betroffenen Funktionen übersichtlich in einer Excel-Tabelle ausgegeben. Dies beschreibt die simpelste Anwendung des Simulationsprogrammes, die in Bild 21 schematisch abgebildet ist.

Für eine umfassende Betrachtung der Auswirkungen aller Bauteilfehlfunktionen ist diese Einzelereignissimulation zu begrenzt. Aus diesem Grund wurde das Hauptprogramm, das auf das Simulink-Modell zugreift und die Parametrierung vornimmt, erweitert. Die Manipulation einzelner Funktionsstatus von Bauteilen wird automatisch vorgenommen und über einen Algorithmus nach jedem Simulationsdurchlauf eine neue Startparametrierung erstellt. Durch diese Methode ist es möglich, den Einfluss der verzögerten Statusvariablen v_x der Bauteilfunktionen zu untersuchen. Hierzu wird nach jeder Simulation überprüft, welche Bauteilfunktionen als verzögert beeinflusst berechnet wurden. Für diese Funktionen wird der Status für den kommenden Simulationsdurchlauf als entsprechend fehlerhaft vordefiniert und so die längerfristige Auswirkung eines anfänglichen Fehlzustandes ermittelt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis keine neuen verzögerten Fehlfunktionen hinzukommen.

Bild 22 verdeutlicht den Ablauf des Hauptprogramms in Matlab. Nach der Simulation aller Fehlerszenarien gibt das Hauptprogramm ein Ergebnisobjekt zurück, das für jede einzelne Bauteilfunktion sowohl die verursachenden Fehlzustände als auch die Folgen des eigenen Fehlzustandes bereitstellt. Dieses Gesamtergebnis der Simulation lässt sich abschließend über die Formulierung von Hauptereignissen (Fehlzuständen) nach dem Vorbild einer FTA ordnen. Das bedeutet, dass im Vor-

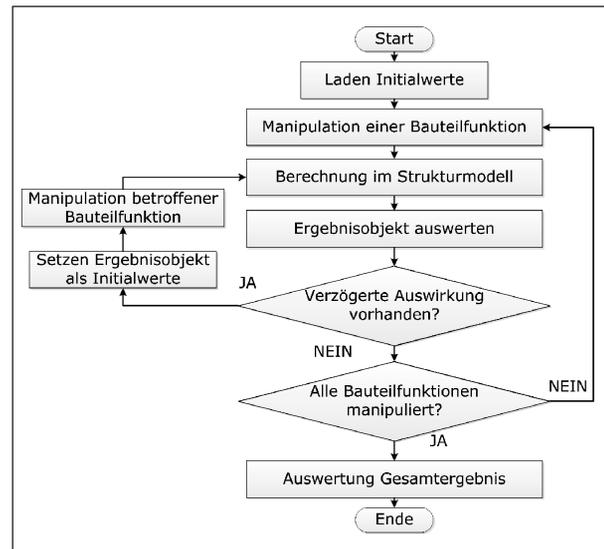


Bild 22: Programmablaufplan des Hauptprogrammes in Matlab

feld vom Nutzer eine Liste von besonders als wichtig bzw. kritisch einzustufenden Funktionen erstellt wird. Nach der Gesamtsimulation des Ausfallmodells des elektrischen Antriebsstrangs werden für diese Funktionen alle Fehlerzustände ermittelt und geordnet, die zur eigenen Fehlfunktion führen. Die Ergebnisse der Ausfallbetrachtungen für ausgewählte Hauptfunktionen sind in Kapitel 5.1 bzw. in Anhang B dargestellt.

3.3.4 Validierung des Ausfallmodells des elektrischen Antriebsstrangs

Das Verhalten der Einzelelemente im Ausfallmodell des elektrischen Antriebsstrangs beruht auf Annahmen, die mit Hilfe von Expertenwissen und des Systemreports aus AP1 getroffen wurden. Um die getroffenen Annahmen zu bestätigen oder gegebenenfalls zu korrigieren, wurden für besonders kritische oder eventuell unsichere Annahmen Versuche an Realfahrzeugen durchgeführt. Allerdings konnten in dem verallgemeinerten Modell des elektrischen Antriebsstrangs Sicherheits- und Diagnosemechanismen – die Fehlerzustände abfangen und eventuell einen Notlaufbetrieb auslösen – nicht abgebildet

werden. Das liegt zum einen an der Vielfalt derartiger Mechanismen und daran, dass ihre Funktionsweise oder das Vorhandensein oft unbekannt ist. Die Versuche wurden an einem Mitsubishi i-MiEV und an einem Toyota Prius II durchgeführt. Hierfür standen die (soweit bekannten) CAN-Nachrichten per Schnittstelle und Lesegerät, diverse Messgeräte und der ABS-Prüfstand der FSD zur Verfügung. Messwerte, Bilder zur Dokumentation der Versuche und Fehlerspeichereinträge befinden sich im digitalen Anhang.

Nachfolgend werden die durchgeführten Validierungsversuche zur Überprüfung des Ausfallmodells beschrieben.

Ladeanschluss

Das Ausfallmodell geht von der Annahme aus, dass das Statussignal des externen Ladeanschlusses bei Ausfall die Ladung des Energiespeichers unterbindet.

Durchführung

Für die Nachbildung des Ausfalls des Statussignals wurde die Signalleitung an der Ladesteckdose des i-MiEV getrennt. Anschließend wurde das Ladekabel gemäß einer normalen Batterieladung an den Kontakt angeschlossen, woraufhin im Normalfall die Ladung der HV-Batterie automatisch eingeleitet würde.

Ergebnis

Die getrennte Signalleitung an der HV-Steckdose des Fahrzeuges hat das System erkannt. Im Cockpit leuchtete eine entsprechende Warnlampe auf, und die Überwachung des CAN-Signals für den Ladestrom ergab, dass die Ladung der Batterie nicht eingeleitet wurde. Die Annahme aus dem Modell wurde somit bestätigt.

HV-Klimakompressor

Der Klimakompressor in elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist nicht nur für die Innenraumklimatisierung verantwortlich, sondern er ist auch Teil des Batteriekühlkreislaufes. Fällt er aus, fehlt auch die Kühlung für die HV-Batterie und trägt zu ihrer Belastung bei.

Durchführung

Der Ausfall des Klimakompressors wurde über die Trennung der HV-Energieversorgung realisiert. Am

Versuchsstand wurde anschließend die Innenraumklimatisierung des i-MiEV aktiviert und die Reaktion des Fahrzeuges mit aktiviertem Antrieb beobachtet.

Ergebnis

Der Ausfall des Klimakompressors wurde vom System nicht bemerkt. Es wurde weder ein Fehlersignal per CAN noch ein Eintrag in den Fehlerspeicher der Diagnoseeinheit festgestellt. Die äußeren Gegebenheiten (tiefe Temperaturen) machten leider einen Versuch, die Batterie in einen kritischen Temperaturbereich zu bringen, unmöglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass das System bei erhöhter Energiezellentemperatur zunächst die abgegebene Leistung begrenzt und im Extremfall ganz abstellt. Die Annahme, dass ein Ausfall des Klimakompressors die HV-Batterie erhöhter Belastung aussetzt, wird jedoch als zutreffend eingestuft.

HV-Heizaggregat

Analog zum Versuch mit dem Klimakompressor wird untersucht, ob ein Ausfall des Heizaggregats im i-MiEV die Klimatisierung der Batterie dahingehend beeinflusst, dass die HV-Batterie einer zusätzlichen Belastung ausgesetzt ist.

Durchführung

Der Ausfall wurde über die Trennung der HV-Versorgung erzeugt. Im Anschluss wurde das Fahrzeug gestartet und die Heizung eingeschaltet.

Ergebnis

Die Trennung des Heizaggregats wurde vom System nicht festgestellt. Die Heizung hat auch auf höchster Leistungsstufe keinen Fehlerspeichereintrag oder ein Fehlersignal über CAN-Signal erzeugt. Die Batterieklimatisierung bei tiefen Temperaturen konnte demnach nicht gewährleistet werden, was bei einer Leistungsentnahme aus der Batterie eine erhöhte Belastung derselben bedeutet. Die zuvor getroffene Annahme wurde bestätigt.

Unterdrucksensor des BKV

Im Modell wird davon ausgegangen, dass ein Ausfall des Unterdrucksensors automatisch zum Ausfall der Bremskraftunterstützung führt.

Durchführung

Zur Modellierung eines Ausfalls wurde der Steckverbinder des Unterdrucksensors im i-MiEV entfernt. Das Fahrzeug wurde daraufhin gestartet und die Bremse betätigt.

Ergebnis

Beim Starten des Fahrzeuges ertönt sofort ein Warnton, und es wird ein Warnsignal im Cockpit angezeigt. Zudem erscheint ein Eintrag im Fehlerspeicher des Diagnosegerätes. Im Normalzustand wird die Unterdruckpumpe des BKV beim Starten des Fahrzeugs und nach dem Lösen des Bremspedals aktiviert. Nach Trennen des Unterdrucksensors und während der Betätigung des Bremspedals wird die Unterdruckpumpe zyklisch aktiviert. Hier zeigt sich ein Notlaufbetrieb, der bei Ausfall des Unterdrucksensors weiterhin die Bremskraftunterstützung aufrechterhält. Der Notlauf kann jedoch nicht auf alle Fahrzeugmodelle übertragen werden, und somit wird der Ausfall des Unterdrucksensors weiterhin als Ausfallursache für die Bremskraftverstärkung beibehalten.

Temperatursensor Kühlkreislauf WR/ Elektromaschine

Der Ausfall des Temperatursensors im Kühlkreis für Wechselrichter und Elektromaschine ist im Modell gleichbedeutend mit dem Ausfall der Kühlung generell.

Durchführung

Die Steckverbindung des Temperatursensors wird getrennt und die Reaktion des Systems nach dem Starten des i-MiEV beobachtet. Erwartet wird ein Ausfall des Kühlsystems von Elektromaschine und WR.

Ergebnis

Der Ausfall des Temperatursensors des Kühlkreislaufes wird umgehend nach dem Starten des Fahrzeuges entdeckt. Eine Fehlermeldung wird sowohl im Fehlerspeicher vermerkt als auch im Cockpit angezeigt. Das System reagiert auf den Fehlzustand mit einem permanenten Betrieb der Kühlwasserpumpe und des Lüfters auf höchster Leistungsstufe. Die Kühlung wird also trotz Ausfalls des Temperatursensors aufrechterhalten.

Temperatursensor Elektromaschine

Analog zum Temperatursensor des Kühlkreises von WR und Elektromaschine geht das Ausfallmodell davon aus, dass ein Ausfall des Temperatursensors der Elektromaschine zum Ausfall der Kühlung der Elektromaschine führt.

Durchführung

Die Signalleitung des Temperatursensors der Elektromaschine des i-MiEV wird in den Fahrerraum geführt, sodass der Ausfall des Temperatursensors sowohl im Stand als auch während der Fahrt erzeugt werden kann.

Ergebnis

Bei Trennung der Signalleitung vor dem Start des i-MiEV lässt sich das Fahrzeug nicht in den fahrbereiten Zustand versetzen. Fehleranzeigen sind sowohl im Fehlerspeicher als auch im Cockpit zu finden. Während der Fahrt löst die Trennung umgehend einen Ausfall des Antriebs aus. Das Fahrzeug rollt aus und lässt sich auch nicht wieder in den fahrbereiten Zustand versetzen. Die Kühlung wird nicht in einen Notlauf versetzt, sondern das Fahrzeug umgehend außer Betrieb gesetzt. Dies entspricht ebenso einem kritischen Zustand, da während der Fahrt, z. B. während eines Überholvorganges, der Wegfall des Antriebs zu einer sicherheitsgefährdenden Situation führen kann. Dieses Szenario wurde in das Ausfallmodell übernommen.

Zusatzbatterie

Im Modell bewirkt ein Trennen der Zusatzbatterie, dass das Starten des Fahrzeuges nicht mehr möglich ist. Jedoch wären weitere Auswirkungen der Trennung während der Fahrt denkbar und sollen deswegen überprüft werden.

Durchführung

Der Massekontakt der Zusatzbatterie des i-MiEV wird vor und nach dem Start des Fahrzeuges getrennt und die Reaktion beobachtet.

Ergebnis

Wie erwartet, lässt sich das Fahrzeug bei getrennter Zusatzbatterie nicht starten. Da die Steuergeräte nicht aktiviert sind, ist auch keinerlei Fehlersignal oder Fehlerspeichereintrag festzustellen. Beim

Trennen nach dem Versetzen in den fahrbereiten Zustand werden keinerlei Auswirkungen festgestellt. Erst nach Anschluss eines Digital-Oszilloskopes an das LV-Netz ist vor allem im fahrenden Zustand ein erhöhter Spannungsrippel feststellbar. Dieser hat aber keine Auswirkungen auf das restliche System. Die Annahme des Modells gilt als bestätigt.

DC/DC-Konverter

Ein Trennen der Verbindung zwischen Zusatzbatterie und DC/DC-Konverter bewirkt im Modell eine Belastung der Zusatzbatterie und führt auf lange Sicht zu einem Ausfall der LV-Versorgung.

Durchführung

Die Verbindungsleitung des DC/DC-Konverters wird getrennt und das Fahrzeug gestartet. Dabei sollen die Reaktionen des Systems aufgenommen werden. Um die Entladung der Zusatzbatterie beschleunigt darzustellen, wird die Zusatzbatterie abgeklemmt, eine externe Stromquelle an die Kontakte angeschlossen und sukzessive die LV-Spannung gesenkt. Dabei werden der CAN überwacht und regelmäßig Fehlerspeichereinträge ausgelesen.

Ergebnis

Das Fahrzeug (i-MiEV) kann nach der Trennung der Versorgungsleitung weiterhin gestartet werden, stellt jedoch umgehend einen Fehler im LV-System fest. Es wird ein Warnsignal im Cockpit angezeigt und ein Fehlerspeichereintrag durchgeführt. Im Fahrbetrieb entnimmt das LV-Netz der Zusatzbatterie so lange Energie, bis die Spannungen der einzelnen Steuergeräte unter ein kritisches Niveau sinken. Die entsprechenden Steuergeräte und Funktionen fallen aus, bis schließlich der fahrbereite Zustand verlassen wird. Die Unterspannung wird im Fehlerspeicher für die entsprechenden Steuergeräte als Fehlereintrag gesetzt. Die Annahme des Modells gilt als zutreffend.

Leistungshalbleiter im Wechselrichter

Wird im Modell ein Leistungshalbleiter des Wechselrichters als ausgefallen definiert (entspricht einem Leerlauf), so gilt die Annahme, dass eine Halbwelle von zwei Phasen der dreiphasigen Wechselspannung für die Elektromaschine nicht mehr generiert werden kann. Prinzipiell ist aber ein

Antrieb mit reduzierter Leistung bei jedoch hochgradig unregelmäßigem Motorlauf noch möglich.

Durchführung

Der Leerlauf eines Leistungshalbleiters im Wechselrichter des i-MiEV wird zum einen durch die Trennung des Gate-Kontaktes und zum anderen durch die Isolation des Drain-Kontaktes realisiert. Hierbei werden CAN und Fehlerspeicher ausgelesen.

Ergebnis

Beide Ausfallvarianten führen zu dem Ergebnis, dass beim Einlegen des Fahrmodus über den Ganghebel sofort ein Fehler im Cockpit angezeigt wird, der Fehlerspeicher einen entsprechenden Eintrag erhält und der fahrbereite Zustand verlassen wird. Es findet also kein Notlauf statt. Eine reduzierte Leistung ist nicht abrufbar. Die Annahme aus dem Modell hat sich demnach nicht bestätigt, und der Ausfall eines Schaltelementes führt umgehend zum Ausfall des Antriebs.

Rotorpositionssensor der Elektromaschine

Der Ausfall des Rotorpositionssensors bedeutet im Modell den sofortigen Ausfall des Antriebs.

Durchführung

Die Signalleitung des Rotorpositionssensors wird sowohl im Stand als auch während der Fahrt getrennt. Die Signalleitung wird hierzu in den Fahrer-raum des i-MiEVs mittels zusätzlichen Steckkontakts geführt.

Ergebnis

Mit getrennter Signalleitung ist es unmöglich, den fahrbereiten Zustand herzustellen. Entsprechende Warnsignale im Cockpit und Fehlerspeichereinträge werden im System des i-MiEV gesetzt. Während der Fahrt führt die Trennung umgehend zu einem Wegfall des Antriebsmoments bei angetriebener Fahrt und bei Rekuperationsfahrt ebenso zum sofortigen Wegfall des Rekuperationsmoments. Letzteres muss im Modell nachträglich ergänzt werden.

Pilotlinie/Sicherheitslinie

Im Modell führt ein Ausfall der Pilotlinie, also eine Trennung der Signallinie, umgehend zu einem Abschalten der HV-Schütze.

Durchführung

Die Pilotlinie am Wartungsstecker der HV-Batterie des Toyota Prius II wird in den Fahrerraum per Steckkontakt verlängert. Im Stillstand und während der Fahrt wird die Sicherheitslinie unterbrochen und die Reaktion des Systems aufgenommen.

Ergebnis

Ein Trennen der Pilotlinie des Wartungssteckers im Stillstand und im Ready-Modus führt dazu, dass das Fahrzeug nicht in den fahrbereiten Zustand versetzt werden kann bzw. diesen umgehend wieder verlässt und die HV-Schütze geöffnet werden. Ein Fehlersignal wird im Cockpit angezeigt, und der Fehlerspeicher erhält einen entsprechenden Eintrag. Während der Fahrt jedoch führt die Trennung nur zu den Fehleranzeigen, nicht jedoch zu einem Lösen der HV-Schütze. Auch nach dem Stoppen des Fahrzeugs und der Gangwahl „P“ ist es ohne Einschränkungen möglich, die Fahrt wieder aufzunehmen. Erst wenn der Ready-Modus durch Drücken des Power-Schalters verlassen wird, kann dieser nicht wieder eingenommen werden. Es zeigt sich also, dass ein Ausfall der Pilotlinie nur den Start des Fahrzeugs verhindert, während der Fahrt jedoch zu keinen Einschränkungen führt.

Rekuperation bei Fahrdynamikregelung

Durch Rekuperation wird ein bremsendes Moment über die Antriebsachse auf die Straße übertragen. Laut Modellannahme wird dieses Moment während eines Fahrdynamikregelvorganges durch ABS oder ESP unterbunden, damit es keinen störenden Einfluss auf die Fahrdynamikregelung und somit die Fahrsicherheit hat. Eine zweite Annahme geht davon aus, dass – sofern die Fahrdynamikregelung ausfallen sollte – auch das Abschalten der Rekuperation in kritischen Situationen (bspw. blockierende Antriebsräder) nicht mehr gewährleistet wird.

Durchführung

Der Versuch wird sowohl mit dem i-MiEV als auch mit dem Prius durchgeführt. Die Fahrt wird auf dem ABS-Prüfstand der FSD nachgestellt. Im schleppenden Betrieb wird das Fahrzeug in die Rekuperation versetzt und beobachtet, wie sich ein provoziertes blockierendes Rad auf das Rekuperationsverhalten auswirkt. Der Versuch wird mit einem getrennten Raddrehzahlsensor, der die Fahrdynamikregelung außer Kraft setzt, wiederholt.

Ergebnis

Der Versuch bestätigt, dass bei Fahrdynamikregelung durch das ABS an der Antriebsachse die Rekuperation eingestellt wird. Dies konnte über den Stromverlauf der Batterie, die Raddrehzahlen und ABS-Eingriffssignale, die allesamt über CAN überwacht wurden, festgestellt werden. Bei getrenntem Raddrehzahlsensor fiel an beiden Fahrzeugen das ABS aus. Dies führt dazu, dass das Fahrzeug die Rekuperation praktisch gänzlich einstellt. Einzig ein schwaches Schleppmoment wird über ein Rekupe-rationsmoment nachgebildet. Da dieses aber sehr gering ausfällt, kann es vernachlässigt werden. Die Ergebnisse konnten bei beiden Versuchsfahrzeugen festgestellt werden. Das Modell wird um den Ausfall der Rekuperation bei diesem Szenario erweitert.

Vorladung der Zwischenkreise im HV-Netz

Die Vorladung der Zwischenkreise (Laden der Kapazitäten im HV-Kreis) verhindert unerwünschte Stromspitzen und wird über das anfängliche Zuschalten eines Vorladeschützes mit Vorladewiderstand — der den Strom begrenzt — realisiert. Das Ausfallmodell des elektrischen Antriebsstrangs geht davon aus, dass eine ausgefallene Vorladung zur Belastung der HV-Komponenten, insbesondere der Schütze, Zwischenkreiskapazitäten und der HV-Batterie, führt.

Durchführung

In der Schützschialtung des Prius wird der Kontakt des Vorladeschützes getrennt und versucht, das Fahrzeug in den fahrbereiten Zustand zu versetzen, sodass die HV-Batterie dem HV-Netz zugeschaltet wird. Spannungen der Zwischenkreise werden per CAN-Signale überwacht.

Ergebnis

Es ist der wiederholte Versuch des Systems hörbar, die Schütze in üblicher Folge zu schalten. Hiernach wird ein Warnsignal im Cockpit angezeigt und ein Fehlerspeichereintrag getätigt. Das Fahrzeug lässt sich nicht in den Ready-Modus versetzen, und es wird keine Spannung an das HV-Netz angelegt. Eine fehlende Vorladung kann also, sofern sie immer erkannt wird, nicht zur Belastung der Bauteile führen: Sie unterbindet gänzlich den fahrbereiten Zustand.

3.4 Allgemeine theoretische Betrachtung zur Manipulation der sicherheits- und umweltrelevanten Bauteile

Manipulationen an Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang erfolgen mit unterschiedlichen Zielen:

- Erhöhung der Fahrleistung,
- Erhöhung des Zyklenumfangs der Batterie zur Erhöhung der nutzbaren Energie und Reichweite,
- Außerkräftsetzen von einschränkenden Sicherheitsmechanismen, z. B. des Isolationswächters oder der Geschwindigkeitsbegrenzung.

Grundsätzlich ist die Manipulation durch Veränderung der Sensorik bzw. Beeinflussung der Signalverarbeitung mit relativ geringem Aufwand möglich. Eingriffe in den Programmablauf der steuernden Komponenten hingegen sind nur unter großem Aufwand durchführ- und für den Sachverständigen feststellbar.

Die Beeinflussung der Sensorwerte kann durch Veränderung der Sensorposition (Wertaufnahme wird für das zu steuernde Verhalten irrelevant) oder durch Simulation eines Messwertes erfolgen. Dies ist durch festes Einbringen eines Spannungsteilers oder das Nachbilden des Sensorsignals an den Sensorleitungen möglich. Ein Eingriff in die Sensorwertverarbeitung kann in erster Linie durch Veränderung der Steuersoftware erfolgen. In jedem Fall ist die genaue Kenntnis der zu beeinflussenden Steueralgorithmen notwendig. Derartige Manipulationen sind nur sehr schwer zu detektieren.

Manipulationen sind auch durch den Austausch von Systemkomponenten möglich. Der in der Regel vorhandene Informationsaustausch mit anderen Steuergeräten über einen Datenbus erschwert diesen Weg jedoch und erleichtert das Detektieren.

Leistungssteigernde Manipulationen am elektrischen Antriebsstrang führen neben den vom konventionellen Antriebsstrang bekannten Gefährdungen zu einer erhöhten Belastung des Energiespeichers. Dies vergrößert je nach verwendetem Energiespeicher, dessen Auslegung und der implementierten Sicherheitssysteme das Gefahrenpotenzial, was im schlimmsten Fall zum Brand führt.

4 Ermittlung der möglichen Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf konventionelle Bauteile hinsichtlich der Verkehrssicherheit

4.1 Beeinflusste Fahrzeugparameter

Im Vergleich zwischen einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und einem rein elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeug ist zu erwarten, dass Komponenten im Antriebsstrang entfallen oder grundlegend verändert werden.

Hauptsächlich entfallen – je nach Elektrifizierungsgrad – direkte Komponenten des Verbrennungsmotors (VM) wie Zylinderkurbelgehäuse, Abgasanlage, Kühlanlage und Kraftstoffversorgung. Aufgrund des Momentverlaufs bei der Elektromaschine kann auch weitgehend auf gestufte Getriebe zur Drehzahlanpassung und eine Kupplungseinrichtung zur Momenterhöhung sowie zum Ausgleich der Drehzahllücke beim Anfahrvorgang verzichtet werden. Hydraulische, riemengetriebene Lenkhilfen werden nach dem Stand der Technik auch heute schon bei Kraftfahrzeugen mit konventionellem VM durch vollelektrische oder elektrohydraulische Systeme ersetzt.

Die grundlegenden Systeme der Achs- und Radführung mit den integrierten Feder-Dämpfer-Elementen, die die Fahrdynamik maßgeblich beeinflussen, bleiben unabhängig von der ausgeführten Antriebsart weitgehend erhalten. Diese Systeme müssen bedingt durch die Integration der elektrischen Komponenten und deren Anforderungen angepasst werden. Mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden mehrere Parameter des Fahrzeugs im Vergleich zum ausschließlichen Antrieb mit Verbrennungsmotor beeinflusst:

- Schwingungsverhalten,
- Geräuschverhalten,
- Drehmoment-/Leistungscharakteristik,
- Aufbau/Packaging des Antriebsstrangs und der Antriebsaggregate,
- Gewichtsverteilung im Fahrzeug,
- Beschleunigungs-/Bremsverhalten,
- Reichweite,

- Wärmehaushalt im Fahrzeug.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs erfolgt zu meist durch eine zentral im Antriebsstrang angeordnete Motoreinheit, die entweder direkt oder über ein Getriebe die Antriebsräder antreibt. Das Antriebsaggregat wird meist als kompakte Baueinheit möglichst nahe an den Antriebsrädern platziert, um mechanische Verluste zu vermeiden (vgl. Mitsubishi iMiEV als heckgetriebenes Fahrzeug mit kompakter Antriebseinheit auf der Hinterachse). Durch den hohen spezifischen Wirkungsgrad der Elektromaschine und der zugehörigen Steuerung verändert sich der Wärmehaushalt im Fahrzeug deutlich. Die großen Wärmeübertrager, die in Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb für die Abführung der Abwärme aus dem Betrieb des VM notwendig sind, können bei elektrifizierten Fahrzeugen deutlich kleiner gestaltet werden bzw. ganz entfallen. Bedingt durch die kompakte Bauweise und die deutlich geringere Abwärme eines elektrifizierten Antriebsstrangs, ergeben sich damit neue Aspekte für das Packaging und die Fahrzeuggestaltung. Wegen des geringeren Bauvolumens und der kleineren zu übertragenden Energiemenge müssen Wärmeübertrager nicht mehr im Frontbereich angebracht werden. Die Frontpartien von elektrifizierten Kraftfahrzeugen können damit verstärkt nach den Anforderungen an das Crashverhalten und der Aerodynamik gestaltet werden.

Der Verbrennungsmotor weist im niedrigen Drehzahlbereich einen ansteigenden Drehmomentverlauf auf und entfaltet bei mittlerer Drehzahl sein maximales Drehmoment, welches im hohen Bereich wieder abfällt. Elektromotoren haben grundsätzlich eine andere Drehmomentkennlinie als Verbrennungsmotoren. Sie entwickeln vom Stillstand an ihr maximales Drehmoment und bewegen sich weiter in einem Konstant-Drehmoment-Bereich. Ist eine bestimmte Drehzahl erreicht, nimmt das Drehmoment wieder ab und bewegt sich weiter in einem Konstant-Leistung-Bereich. Durch diese verschiedenen Charakteristiken ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Konstruktion und Auslegung der Befestigungskomponenten der Antriebseinheit.

Diese festgestellten Parameter wirken sich direkt auf die konventionellen Komponenten des Kraftfahrzeugs aus:

- Momentabstützung von Antriebsaggregat und Fahrwerkskomponenten,

- Aufhängungs- und Montageteile von Energiespeicher und Antriebsaggregat,
- Bremseinrichtungen,
- Karosseriekonstruktion des Fahrzeugs,
- Konstruktion der Frontpartien.

4.2 Rückwirkungen der beeinflussten Fahrzeugparameter auf konventionelle Bauteile

Belastung der Lagerkomponenten des Antriebsstrangs durch Momentverlauf der E-Maschine

Aufgrund des zuvor beschriebenen Momentverlaufs einer E-Maschine (z. B. Synchronmaschine: maximales Drehmoment bei Drehzahl 0) sind beim Betrieb veränderte Belastungen der Komponenten im Antriebsstrang zu erwarten. Durch das hohe Moment von E-Maschinen werden – auch im Zusammenhang mit der Möglichkeit, das Fahrzeug elektrisch zu bremsen – starke Lastwechselreaktionen in die Lagerungskomponenten des Antriebsstrangs von elektrifizierten Fahrzeugen eingeleitet. Um konventionelle Bauteile aus Baureihen mit VM einsetzen zu können, scheint es sinnvoll, das Anfahrmoment bei E-Fahrzeugen zu beschränken. Wird diese Beschränkung nachträglich aufgehoben, kann dies aufgrund der zur Auslegung veränderten Belastung zu erhöhtem Verschleiß bis hin zum Bauteilversagen führen.

Im Gegensatz zum VM erfolgt die Kraftabgabe der Elektromaschine allerdings deutlich gleichförmiger. Drehzahl- und Momentpulsation und damit auch die in den Antriebsstrang eingeleiteten Schwingungen sind deutlich geringer als beim VM und lassen keinen erhöhten Bauteilverschleiß erwarten. Als Folge der deutlich geringeren Abwärme der Elektromaschine sind zudem geringere thermische Belastungen für die Aufhängungskomponenten zu erwarten. Dazu gehören vor allem Bauteilbelastungen aufgrund von durch Wärme verursachte Spannungen sowie eine thermisch bedingte Materialalterung.

Wie bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen beeinflussen Ausfälle der Lagerkomponenten die Fahrdynamik des Fahrzeugs. Daher müssen alle Maßgaben, die für die Begutachtung von Lagerungskomponenten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren gültig sind, auch für die Begutach-

tung von elektrifizierten Fahrzeugen berücksichtigt werden.

Belastung der Antriebskomponenten beim elektrischen Bremsen

Beim Einsatz der Motorbremse bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden abhängig von der gewählten Fahrstufe Verzögerungen von 0,5 bis 1,0 m/s² erreicht (COLL 2013). Beim elektrischen Bremsen können deutlich höhere Verzögerungen erreicht werden. Der BMW MINI E erreicht Verzögerungswerte von etwa 3,0 m/s² im rein elektrischen regenerativen Bremsbetrieb ohne Einsatz des mechanischen Reibbremssystems. Die umgesetzte Bremsenergie wird dabei vom Rad über den gesamten Antriebsstrang in die E-Maschine eingeleitet. Dabei kommt es nicht nur zu einer höheren Belastung von Antriebswellen, Gleichlaufgelenken und Ausgleichsgetrieben als bei VM-betriebenen Fahrzeugen im Bremsbetrieb. Auch in die Motorlagerung und die entsprechenden Abstützungspunkte im Karosseriebereich des Fahrzeugs werden hohe Kräfte eingeleitet. Die Bremswirkung wird beim regenerativen Bremsen damit nicht mehr in unmittelbarer Nähe des Rades wie bei den heute üblichen Konstruktionen aufgebracht, sondern durch die Elektromaschine. Die Übertragungseinrichtungen sind mit Ausnahme des Einsatzes von Radnabenmotoren Teil des regenerativen Bremssystems.

Mechanische Bremssysteme

Beim regenerativen Bremsen wird die kinetische Energie der Antriebsräder, die bei einem konventionellen Antrieb mit VM durch die Reibbremsen oder durch das Schleppmoment des VM in Reibungswärme umgewandelt wird, durch die generatorisch betriebene Elektromaschine in elektrische Energie umgesetzt und in einen Zwischenspeicher (z. B. Traktionsbatterie) eingespeist. Dadurch wird eine abbremsende Wirkung erzielt, und die zwischengespeicherte Energie kann später wieder abgerufen werden.

Unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens wird nach dem Stand der Technik meist ein kooperativ regeneratives Bremssystem eingesetzt. Ein Teil oder das gesamte Bremsmoment der Reibbremse wird dabei abhängig vom Fahrzustand gegen ein regeneratives Bremsmoment ausgetauscht.

Durch die große erzielbare elektrische Bremsleistung von E-Fahrzeugen (s. o.) werden die mechanischen Bremssysteme geringer beansprucht, und die kilometerbezogene Einsatzzeit sinkt. Damit ist eine deutlich verlängerte Standzeit der mechanischen Komponenten zu erwarten. Mechanische Bremssysteme sind nach dem Stand der Technik für einen kontinuierlichen Einsatz ausgelegt. Lange Perioden geringer Nutzung beeinträchtigen ihre Wirkung oder können zu Ausfällen führen.

Bei sehr geringen Drehzahlen kann die Elektromaschine kein generatorisches Moment bereitstellen. Das regeneratives Bremsmoment sinkt und muss durch ein Reibmoment ersetzt werden. Wird die mechanische Bremsanlage über eine längere Nutzungsdauer nur für Abbremsungen des Fahrzeugs vom Ende des regenerativen Bremsvorgangs bis zum Stillstand eingesetzt, ist zu erwarten, dass bei einer Gefahrenbremsung nicht sofort die voll ausgelegte Bremsleistung des mechanischen Bremssystems abgerufen werden kann. Die geringe Einsatzzeit und die damit verbundene erhöhte Verbaudauer können zu vorzeitiger Degradation der Bremsleistung und der mechanischen Bremsanlage durch Korrosion und Verschmutzung führen.

Des Weiteren ist bei zunehmender Verzögerung zu beachten, dass die Normalkraft der Räder der Hinterachse sinkt. Für die Fahrstabilität ist die Bremskraftverteilung damit von besonderer Bedeutung. Ist die Elektromaschine an die Räder der Vorderachse angeschlossen, lässt sich bei starker Verzögerung auch weiterhin ein großes regeneratives Bremsmoment umsetzen. Wirkt die Elektromaschine auf die Hinterachse, nimmt das regeneratives Bremsmoment mit zunehmender Verzögerung ab. Tritt bei einem Fahrzeug mit auf die Hinterachse wirkender Elektromaschine eine Degradation der Reibbremsanlage an der Vorderachse auf, sind bei weiterhin auf Abbremsungen im normalen Arbeitsbereich eingestelltem regenerativen Bremsmoment Änderungen der Fahrstabilität zu erwarten.

Karosseriekonstruktionen

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen bedingt den Einbau der notwendigen Komponenten im Kraftfahrzeug. Die größte Gewichts-/Volumenkonzentration ist derzeit bei dem Energiespeicher zu erwarten (i-MiEV ca. 200 kg, Tesla Roadster ca.

400 kg). Die Traktionsbatterie trägt einen Großteil zum Fahrzeuggewicht bei und muss daher sicher in die tragenden Strukturen des Fahrzeugs eingebunden werden. Die Befestigungspunkte müssen entsprechend den Belastungen im Betrieb dimensioniert sein und die Aufhängungspunkte des Antriebsstrangs den veränderten Momentverläufen der E-Maschine angepasst werden. Neue Möglichkeiten ergeben sich in der Karosseriegestaltung und damit auch für das Kollisionsverhalten des Fahrzeugs durch ein verändertes Packaging.

5 Einschätzung des Gefährdungspotenzials für die Verkehrssicherheit des Fahrzeugs sowie für den Sachverständigen bzw. Prüflingenieur im Rahmen der Hauptuntersuchung

5.1 Simulationsergebnisse

Zur Detektion kritischer Bauteile, die zu sicherheitsrelevanten Situationen führen, wurde das in Kapitel 3.3 beschriebene Software-Simulationsmodell eingesetzt. Nach den Validierungsversuchen und den darauffolgenden notwendigen Korrekturen des Ausfallmodells konnte dieses mit Bezug auf die aufgezeigten Fehlerszenarien als verlässlich betrachtet werden.

Das Gesamtergebnisobjekt der Simulation umfasst alle resultierenden und alle verursachenden Fehlfunktionen einer jeden Fehlfunktion sämtlicher Bauteile. Die Summe aller Ergebnisse ist jedoch eine schwer überschaubare Informationsmenge, und nicht jeder Ausfall ist als kritisch zu bewerten. Deshalb wurden nach Art der deduktiven Analyse kritische Funktionen des elektrischen Antriebsstrangs definiert, deren Ausfallursachen gezielt untersucht werden sollten. Das entwickelte Simulationstool konnte mit dieser Vorgabe filtern, welche Szenarien zu Fehlzuständen der betrachteten Funktionen führen. Im Folgenden werden die ausgewählten Hauptfunktionen genannt und eine Auswahl von kritischen Ausfallursachen beschrieben, wie sie die Simulation hervorgebracht hat. Eine Übersicht aller Ausfallszenarien der Simulation für die betrachteten Hauptfunktionen findet sich in Anhang B. Die Ursachen der einzelnen Bauteilausfälle sind in Kapitel 3.1 und 3.2 beschrieben.

Fehlzustand Momentenanforderung

Hier handelt es sich um die Hauptfunktion „Fahrzeug beschleunigen“ des Elements „Fahrer/Fahrzeug“ im Untersystem HMI des Simulationsmodells. Als entscheidende Funktion eines Fahrzeugs ist sie als sicherheitskritisch zu betrachten, vor allem beim plötzlichen Wegfall des Antriebs, bspw. während eines Überholvorgangs.

Primäre Ursache ist der Ausfall der Elektromaschine. Alle Elemente, die die Energie vom Energiespeicher zur Elektromaschine transportieren, können ebenso zum Ausfall des Antriebs führen: die HV-Leitungen und HV-Schütze, die HV-Batterie selbst und vor allem der Wechselrichter. Er kann aufgrund verschiedener Ursachen die Versorgung der Elektromaschine einstellen, hervorgerufen durch Fehlfunktion vom Steuergerät des Wechselrichters oder aller Sensoren am Wechselrichter, wie z. B. die Stromsensoren der drei Phasen oder den Rotorlagesensor. Aus den Validierungsversuchen ist der Einfluss des Temperatursensors der Elektromaschine in das Simulationsmodell mit eingeflossen. Fällt der Temperatursensor aus, wird die Generierung von Strangspannungen für die Elektromaschine umgehend eingestellt. Auch die Rekupe-ration von Bremsenergie ist nicht mehr möglich. Des Weiteren führen sowohl ein Kurzschluss als auch ein Leerlauf eines Leistungshalbleiters im Wechselrichter unmittelbar zum Ausfall des Antriebs. Im weiteren Sinne zählt das Starten des Fahrzeugs in die Funktion des Antreibens mit hinein. Hierfür ist die Versorgung des LV-Kreises über die Zusatzbatterie bzw. entsprechende Versorgungsleitungen ein Ausfallgrund. Ebenfalls führt eine getrennte Pilotlinie oder auch fehlende Vorladung (ausgelöst zum Beispiel durch einen defekten Vorladeschutz) zum Verlust der Startfähigkeit.

Ursache für die Minderung der Antriebsfähigkeit kann eine Beeinträchtigung der Induktivitäten der Elektromaschine sein.

Fehlzustand konventionelle Bremsanlage

Hierunter ist die Beeinträchtigung des Bremssystems, das eine Unterstützung für die Bremsbetätigung darstellt, zu verstehen. Die Funktion wird ebenfalls im Element „Fahrer/Fahrzeug“ mit der Unterfunktion „Fahrzeug abbrem- sen“ beschrieben.

Primäre Ausfallursachen der Bremskraftunterstützung sind unter anderem das Hydroaggregat, das

Bremspedal selbst und natürlich das Steuergerät für die Bremsanlage, das die Steueralgorithmen von ABS, ESP etc. enthält. Generell können nahezu alle Elemente im Bremshydraulikkreis zum Ausfall der Bremskraftunterstützung führen. Dazu zählen der Membranwegsensoren, die Unterdruckpumpe des BKV und die LV-Versorgung der aktiven Elemente über Zusatzbatterie und LV-Leitungen. Die Unterstützung durch Fahrdynamikregelungen (ABS, ESP) hängt direkt von der Funktionalität der zugehörigen Sensoren wie Raddrehzahlsensoren und Fahrdynamiksensoren ab.

Fehlzustand Rekuperation

Da die Rekuperation von Bremsenergie für ein Bremsmoment an der Antriebsachse sorgt, ist sie als sicherheitskritisch zu bewerten. Ein unerwartetes Verhalten (plötzlicher Ausfall oder Einsetzen der Rekuperation) kann zu Gefahrensituationen führen. Die Hauptfunktion ist über die Funktion „Rekuperationsleistung“ der Elektromaschine im Simulationsmodell dargestellt. Prinzipiell führen alle Ursachen für den Ausfall der Beschleunigung (s. Fehlzustand Momentenanforderung) auch zum Ausfall der Rekuperation. Hinzu kommen die Elemente, die zum Abstellen der Rekuperation dienen, wie die Fahrdynamikregelsysteme. Dazu zählen das Steuergerät der Bremse, die Raddrehzahlsensoren und der Fahrdynamiksensoren, deren plötzliche Fehlfunktion zum Abschalten der Rekuperation führt.

Kritisch zu nennen ist auch eine unerwartete Rekuperation. Sie kann durch die Parameter, die die Rekuperation steuern, hervorgerufen werden: z. B. das Bremspedal oder Bremsdrucksensoren, die das Äquivalenzmoment für die Rekuperation vorgeben. Auch der Fahrpedalsensoren kann hierfür verantwortlich sein.

Fehlzustand aktives Kurzschließen der Synchronmaschine

Eine Sicherheitsfunktion bei Fahrzeugen mit Synchronmaschine im elektrischen Antriebsstrang sieht vor, dass im Notfall die noch in Bewegung befindliche Elektromaschine kurzgeschlossen werden kann. Dies führt zwar zu einer hohen Belastung der Synchronmaschine, ist aber notwendig, um bei einem Unfall das HV-Bordnetz spannungsfrei zu schalten. Hierfür ist der Wechselrichter mit der Modellfunktion „Aktives Kurzschließen der Synchronmaschine“ zuständig.

Bauteile, die zur Beeinträchtigung dieser Sicherheitseinrichtung führen können, sind unter anderem die Leistungshalbleiter (Ausfall in Form eines Leerlaufs) sowie das Steuergerät des Wechselrichters selbst, da die Schaltelemente im Notfall aktiv geschaltet werden müssen. Auch der Wegfall der LV-Versorgung führt zur Gefährdung dieser Funktion. Das Airbagsystem löst die Sicherheitsschaltung des Wechselrichters aus und ist damit eine mögliche Ursache für den Fehlzustand des aktiven Kurzschließens.

Fehlzustand sicheres Abschalten HV-System

Die Funktion der HV-Schütze ist es, im gegebenen Fall die Kontakte zwischen HV-Batterie und HV-Bordnetz sicher zu trennen. Dies ist mit der Funktion „Fähigkeit, HV sicher zu trennen“ im Modell dargestellt. Das Trennen der HV-Verbindung stellt die Spannungsfreiheit des Systems sicher und wird im Bedarfsfall, etwa bei einem Unfall oder bei Isolationsproblemen sowie durch Deaktivieren der Fahrbereitschaft, ausgelöst.

Ursache für den Fehlzustand des sicheren Abschaltens sind u. a. die Schütze, die bei Kontaktverschmelzung nicht mehr in der Lage sind, den Kontakt zur Batterie zu lösen. Hinzu kommt der Isolationswächter mit zugehörigem Messwiderstand. Auch ein fehlerhaftes Batteriemanagementsystem kann das Trennen der HV-Verbindung beeinträchtigen. Analog zum aktiven Kurzschließen der Synchronmaschine kann auch das Öffnen der Schütze durch den Airbagsensoren und zugehöriges Steuergerät ausgelöst werden. Daher kommen sie auch für eine Fehlfunktion infrage. Ein Defekt der pyrotechnischen Sicherung kann im Notfall dazu führen, dass die Schütze nicht ordnungsgemäß getrennt werden. Im Gegenzug kann sie aber auch dafür sorgen, dass die Schütze unbeabsichtigt geöffnet werden.

Kritischer Zustand der Batterie

Die HV-Batterie ist ein sehr empfindliches Bauteil. Da überwiegend Lithiumionen-Technologien verwendet werden, ist sie anfällig für eine Vielzahl von negativen Einflüssen, die im Extremfall zum Brand und somit zu akuter Sicherheitsgefährdung führen können. Im Simulationsmodell ist dies durch die Belastung der Funktion der „HV-Leistungsbereitstellung des Energiespeichers“ modelliert. Alle Elemente, die das sichere Abschalten der HV-Batterie

gewährleisten müssen, können zu einer Belastung führen (s. Abschnitt „Fehlzustand sicheres Abschalten HV-System“). Von großer Bedeutung ist die Temperaturempfindlichkeit der Batterie. Alle Bauteile, welche die Kühlung betreffen, können im Fehlerfall zu einer nicht ausreichenden Temperaturreduzierung führen. Allen voran zu nennen sind hier die verschiedenen Temperatursensoren, aber auch die Steuergeräte, die für die Kühlung zuständig sind, wie z. B. das Batteriemanagementsystem. Die Elemente des Kühlkreises wie Kühlmittelpumpe, Schläuche, Lüftungsgitter, Klimakompressor, Lüfter können allesamt die ausreichende Kühlung gefährden und somit eine Übertemperatur der Zellen provozieren. Eine Fehlfunktion des Balancings der Batteriezellen kann auch die Batterie belasten, wenn einzelne Zellen eine Über- oder Unterspannung erleiden. Zustände jenseits des vordefinierten Arbeitsbereiches (Spannung, Temperatur, Strom) der Batterie belasten diese ebenso. Sie können z. B. von einem Kurzschluss der Leitungen im HV-System, der Zwischenkreise oder der Leistungshalbleiter ausgelöst werden.

Fehlzustand LV-Spannungsversorgung

Ein Verlust der LV-Versorgung führt zum Verlust sicherheitskritischer Systeme wie der Fahrdynamikregelungssysteme, der Antriebssteuerung und alle anderen Steuergeräte, welche relevante Steueraufgaben übernehmen. Daher ist die LV-Versorgung ebenfalls als sicherheitskritisches Element zu verstehen. Im Simulationsmodell kann sie durch die Funktion der Zusatzbatterie „Liefert Energie für den Fahrzeugstart“ und durch die Funktion der LV-Kabel „Leiten den LV-Strom in das Niederspannungsbordnetz“ dargestellt werden. Primär sind natürlich die LV-Leitungen für die Spannungsversorgung gefährdend. Hinzu kommt aber auch die Zusatzbatterie selbst. Sie kann durch die Elemente belastet werden, die eine Aufladung verhindern, z. B. den DC/DC-Wandler. Er kann über Defekte von Spannungssensoren, des Steuergerätes oder auch durch einen Kontaktverlust mit dem LV-Netz beeinträchtigt werden.

Fehlzustand Fahrerinformationssystem

Warn- und Informationssignale informieren den Fahrer über die Geschwindigkeit, den Ladezustand der Batterie und die Fehlerzustände im Fahrzeugsystem. Dementsprechend wichtig ist ihre Funktionstüchtigkeit, da sonst ein Verhalten des Fahr-

zeugs auftreten kann, das den Fahrer überrascht, wie etwa ein plötzlicher Leistungsabfall oder Leistungsausfall. Die entsprechenden Signale werden im Ausfallmodell des elektrischen Antriebsstrangs über das Bauteil SG-Kombiinstrument mit den verschiedenen Funktionen „Fahrerinformation über Geschwindigkeit“, „Fahrerinformation über Fahrdynamikfunktionen“, „Fahrerinformation über die verbleibende Batteriekapazität“ und „Fahrerinformation über den momentanen Leistungsverbrauch“ abgebildet. Sie sind vor allem für Fehler in der Spannungsversorgung über die LV-Leitungen anfällig. Zudem können auch fehlerhafte Sensorinformationen wie die der Raddrehzahlen oder der HV-Batteriespannung zu falscher Einschätzung von Reichweite und Geschwindigkeit führen. Außerdem sind alle verbundenen Steuergeräte, die die Informationen bereitstellen, potenzielle Fehlerquellen, wie das Steuergerät des Bremssystems, des Batteriemanagementsystems oder des Wechselrichters.

Die angegebenen Bauteile und Funktionen geben eine Auswahl kritischer Elemente aus der Simulation wieder, die zu den zusammengestellten kritischen Ausfällen führen können. Die Gesamtübersicht ist in Anhang B dargestellt.

5.2 Klassifizierung der sicherheits- bzw. umweltkritischen Bauteile nach Gefährdungspotenzial

Um das Gefährdungspotenzial beurteilen zu können, wurden – wie in Kapitel 5.1 beschrieben – folgende sicherheitsrelevante Fahrzeugfehlzustände abgeleitet:

- Momentenanforderung,
- konventionelle Bremsanlage,
- Rekuperation,
- aktives Kurzschließen der Synchronmaschine,
- sicheres Abschalten HV-System,
- HV-Batterie,
- LV-Spannungsversorgung,
- Fahrerinformationssystem.

Dabei wurde festgelegt, ob von ihnen eine potenzielle Quelle für Verletzungen, Gesundheits- oder Umweltschäden in den einzelnen Funktions-/Fehlerzuständen ausgeht. Mit der Gefahrenanalyse soll

festgestellt werden, ob bei Nutzung des Fahrzeugs oder bei Wartung, Reparatur oder Prüfung die Sicherheit oder Gesundheit des Fahrers oder Mitfahrers gefährdet ist. Nachvollzogen wird auch, ob eine direkt bzw. indirekt eintretende, feststellbare nachteilige Veränderung natürlicher Ressourcen droht.

Zur Bewertung des Gefährdungspotenzials wurden zunächst die möglichen Fehlfunktionen der sicherheitsrelevanten Funktionen in Anlehnung an die ISO 26262, „Road vehicles – Functional safety“ eingeschätzt. Die Bewertung der Fehlfunktionen erfolgt laut ISO 26262 nach drei Risikoparametern:

- S (Severity, Fehlerschwere),
- E (Exposure, Aufenthaltswahrscheinlichkeit/Aufenthaltsdauer),
- C (Controllability, Kontrollierbarkeit).

Die Risikoparameter besitzen folgende Ausprägungen:

S: Schwere des Fehlers, Gefährdung des Nutzers oder der Umgebung:

- S0 keine Verletzungen,
- S1 leichte bis mittelschwere Verletzungen (z. B. Gliedmaßen verletzt),
- S2 schwere Verletzungen, Überleben aber sehr wahrscheinlich (z. B. Arm abgetrennt),
- S3 schwerste Verletzungen, Überleben unwahrscheinlich (z. B. Kopf abgetrennt).

Die Einstufung der Verletzungen in die einzelnen Fehlerschwereklassen erfolgt anhand der Klassifizierung nach AIS (Abbreviated Injury Scale).

E: Eintrittswahrscheinlichkeit, d. h. Zusammenwirken von Fehlfunktion und Betriebszustand:

- E1 seltenes Auftreten (z. B. Liegenbleiben auf dem Bahnübergang),
- E2 gelegentliches Auftreten (z. B. Fahren mit Anhänger oder Dachgepäckträger),
- E3 häufiges Auftreten (z. B. Tanken des Fahrzeugs, nasse Straße),
- E4 ständiges Auftreten (z. B. Beschleunigen, Bremsen, Lenken).

Beim Faktor Eintrittswahrscheinlichkeit wird nach zwei möglichen Parametern unterschieden: Aufenthaltsdauer und -häufigkeit des Fehlerauftretens.

C: Beherrschbarkeit des Fehlers:

- C0 sichere Beherrschung (alle Fahrer beherrschen diese Situation, z. B. ungewollte Erhöhung der Radiolautstärke),
- C1 einfache Beherrschbarkeit (mehr als 99 % der Fahrer können die Situation beherrschen, z. B. Lenksäule beim Start des Fahrzeugs eingerastet),
- C2 normale Beherrschbarkeit (mehr als 90 % der Fahrer können die Situation beherrschen, z. B. Ausfall des ABS während einer Notfallbremsung),
- C3 schwierige Beherrschbarkeit (weniger als 90 % der Fahrer beherrschen die Situation, z. B. plötzlich auftretende hohe Lenkkräfte).

Der an den Ablauf der ISO 26262 angelehnte Teil der Durchführung erfolgt bis zur der Gefahren- und Risikoanalyse. Da die Gefahren- und Risikoanalyse sehr umfangreich ist, sind im Folgenden die Ergebnistabellen dargestellt. Beispielhaft wird die Analyse zur Rekuperation genauer erläutert. Die vollständige Analyse ist im Anhang C zu finden (ISO 2011).

Um die Bewertungsmatrix für die Gefahren- und Risikoanalyse erstellen zu können, ist die Festlegung von möglichen Fehlern und Betrachtungsszenarien erforderlich. Die Ausfallszenarien für das Rekuperationsverhalten finden sich in der Definition möglicher Fehler wieder, die sich aus den in der Simulation definierten Fehlerzuständen Ausfall/ Unterfunktion/Überfunktion ergeben.

a) Definition möglicher Fehler:

1. Rekuperation Ausfall,
2. Rekuperation Unterfunktion,
3. Rekuperation Überfunktion.

Die Betrachtungsszenarien lassen sich aus den möglichen Funktions- und Einsatzzuständen des Fahrzeugs ableiten. Dabei sind Anforderungen durch die Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen. Die Umgebungsbedingungen für die Betrachtungsszenarien sind durch den Straßeneinsatz des Fahrzeugs in der Bundesrepublik Deutschland mit

den sich daraus ableitenden Fahrsituationen gegeben. Die Betrachtungsszenarien müssen für jede zu bewertende Fahrzeugfunktion dahingehend separat ausgewählt werden, dass es sich um die Szenarien handelt, für die eine Auswirkung der unter a) definierten möglichen Fehler auf das Gefahren- und Risikopotenzial zu erwarten ist. Wird die Rekuperation aktiviert, hat dies weitreichende Auswirkungen auf die Fahrdynamik des Fahrzeugs. Unbeabsichtigtes Einsetzen der Rekuperation oder eine überhöhte Rekuperationsleistung (Überfunktion) führt zu kritischen Fahrsituationen, wenn sich das Fahrzeug in Bewegung befindet. Während der Gefahren- und Risikoanalyse wurden für den Fehlzustand Rekuperation deshalb die unter b) aufgeführten Betrachtungsszenarien ausgewählt:

- b) Betrachtungsszenarien
1. fährt, Überholvorgang,
 2. fährt, Bergabfahrt,
 3. fährt, Kolonnenfahrt,
 4. fährt, Abbremsung,
 5. fährt, vereiste Fahrbahn.

Diese fünf Betrachtungsszenarien wurden als die Fahrsituationen mit dem höchsten Gefährdungspotenzial für Verkehrsteilnehmer identifiziert. Während eines Überholvorgangs (Szenario 1) befindet sich das Fahrzeug auf dem Fahrstreifen des Gegenverkehrs, während ein Fehlzustand der Rekuperation erfolgt. Kollisionen mit sehr hoher Relativgeschwindigkeit sind dann zu erwarten, wenn der Überholvorgang nicht rechtzeitig oder nur stark verlangsamt beendet werden kann. Bei einer lang andauernde Bergabfahrt (Szenario 2) muss das fahrzeugseitige Bremssystem entgegenwirken, um eine Beschleunigung zu vermeiden. Fällt die Rekuperation aus, kann dies zu einer stärkeren Belastung des Reibbremssystems führen. Ähnlich ist das Szenario 4 (Abbremsung aus hohen Geschwindig-

keiten) zu bewerten. Die Kolonnenfahrt wurde als Szenario 3 ausgewählt, um die Fahrsituation geringer Fahrzeugabstände zu vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugen in die Betrachtung mit aufzunehmen. Ungewollte, zu starke oder zu geringe Verzögerungen führen dabei zu Kollisionen. Auf den Einfluss veränderter Fahrbahnverhältnisse wird mit der Einbeziehung von Szenario 5 eingegangen. Dieses Szenario stellt eine vereiste Fahrbahn und den damit verminderten Reibungskoeffizient dar.

Aus den möglichen Fehlern a) und Betrachtungsszenarien b) wird anschließend eine Matrix (Tabelle 7) erstellt, in der eine Bewertung anhand der in der ISO 26262 definierten Risikoparameter (S, E, C) erfolgt. Die für die Untersuchung relevanten Fehler/Szenarien-Kombinationen sind hervorgehoben.

c) Bewertungsmatrix

Diese Bewertung erfolgte mit den zu Beginn dieses Kapitels erläuterten Kriterien und mit Hilfe denen der in ISO 26262 zu Grunde liegenden Bewertungshilfen in einem Expertenbewertungsgespräch. Für den Fehlzustand Rekuperation werden sie im Folgenden erläutert.

Es entfallen die Kombinationen von Fehler-/Betrachtungsszenarien, die real nicht darstellbar sind. In der Bewertungsmatrix Rekuperation trifft dies auf die Felder 1/1 und 1/2 zu. Beim Ausfall bzw. der Unterfunktion der Rekuperation während eines Überholvorgangs ist keine Gefahrensituation zu erwarten. Für den Überholvorgang wird primär die Momentenerhöhung der Antriebsmaschine durch den Fahrer gefordert, um die Relativgeschwindigkeit zum überholten Fahrzeug zu erhöhen. Ein Rekuperationsausfall bzw. eine Unterfunktion wirkt sich daher nicht negativ auf den Überholvorgang aus, da kein Bremsmoment angefordert wird. Alle Kombinationen, bei denen während der Betrachtung einer der Risikoparameter in die jeweils niedrigste

Szenario \ Fehler	1 Überholen	2 Bergabfahrt	3 Kolonnenfahrt	4 Abbremsen	4 μ vermindert
1 Ausfall	Entfällt	C0	C0	C0	C0
2 Unterfunktion	Entfällt	C0	C0	C0	C0
3 Überfunktion	S2 E3 C3	C0	S1 E4 C1	S1 E4 C1	S2 E2 C3

Tab. 7: Bewertungsmatrix Fehlerszenarien „Rekuperation“

Ausprägung eingeordnet werden kann (S0, E0, C0), entfallen ebenfalls für die weitere Betrachtung. Für die Rekuperation trifft dies auf die Felder 2/1 bis 2/3, 3/1 und 3/2, 4/1 und 4/2 sowie 5/1 und 5/2 zu. Diese betrachteten Kombinationen sind durch jeden Fahrer kontrollierbar, wodurch sich die Einstufung C0 – sichere Beherrschbarkeit – ergibt. Ein Ausfall der Rekuperationsbremse ist mit dem Einsatz der Reibbremse, durch Erhöhung der Pedalkraft am Bremspedal, leicht zu kompensieren. Auch bei einem Fahrzeug, das zusätzlich zur Reibbremsanlage über eine Rekuperationsbremse verfügt, ist eine ausreichende Fahrzeugabbremmung durch die Auslegung der Reibbremse sicherzustellen. Tritt der Fall einer Überfunktion der Rekuperation während einer Bergabfahrt auf (Feld 2/3), ist auch diese Situation durch jeden Fahrzeugführer sicher beherrschbar. Es ist keine hohe Verzögerung zu erwarten. Die Reaktionszeit für nachfolgende Fahrzeuge ist als ausreichend einzustufen, um Kollisionen wirksam zu vermeiden. Aufgrund der höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten wird in den Szenarien 1 bis 4 von einer trockenen Fahrbahn mit normalem Haftreibungskoeffizienten ausgegangen. Veränderte Fahrbahnverhältnisse werden durch die Betrachtung im Szenario 5 eingeschlossen.

Für den Fehlzustand „Rekuperation“ können die Felder 1/3, 3/3, 4/3 und 5/3 als kritisch eingestuft werden. Für diese Kombinationen aus Betrachtungsszenario und Fehlzustand wurde ein Gefahrenpotenzial identifiziert. Auf das Gefährdungspotenzial der Fahrsituation „Überholen“ wurde bereits eingegangen. Kommt es während des Überholvorgangs zu einer Überfunktion der Rekuperation – also zu einer ungewollten Erhöhung der rekuperationsbedingten Verzögerung –, kann dies zu kritischen Fahrsituationen führen. Durch den dadurch bedingten Abbruch des Überholvorgangs bei mittlerer bis hoher Geschwindigkeit und den zu erwartenden Zusammenstoß mit den Gegenverkehr sind ernsthafte Verletzungen zu erwarten. Aufgrund des zu erwartenden Verletzungsgrades erfolgt eine Einstufung in die Ausprägung S2. Die Aufenthaltshäufigkeit eines Überholvorganges kann als E3 eingestuft werden. Da dieser Vorgang bei fast jeder Fahrt stattfindet, ergibt sich eine mittlere Aufenthaltshäufigkeit. Auch für geübte Fahrer ist das plötzliche Abbremsen des Fahrzeugs trotz Momentenanforderung der Antriebsmaschine während eines Überholvorgangs nur schwer beherrschbar. Eine ähnliche Einstufung erfolgt für die Felder 3/3, 4/3 und 5/3, wobei es allerdings zu

leicht veränderten Einstufungen der Ausprägung der Bewertungskriterien kommt. Für das Feld 3/3 kommt es ebenso wie für 4/3 zu einer Erhöhung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Kolonnenfahrten wie auch Abbremsvorgänge kommen generell bei jeder Fahrt vor und können damit in die Ausprägung E4 eingestuft werden. Durch die zu erwartenden kleinen Relativgeschwindigkeiten kommt es zu leichteren Verletzungen und somit zur Einstufung in die Ausprägung S1. Beide Situationen sind zudem einfach und für die Mehrzahl der Fahrer kontrollierbar (Ausprägung C1), da auch bei vollständig aktivierter Rekuperation keine Bremsung mit der Verzögerung einer Notbremsung eingeleitet wird. Für eine Überfunktion der Rekuperation während einer Fahrt auf einer Fahrbahn mit vermindertem Reibungskoeffizienten erfolgt eine Einstufung in die Aufenthaltswahrscheinlichkeit E2, da Fahrten auf vereisten Fahrbahnen für einen weiten Bereich der Fahrer nur für einige Zeitpunkte im Jahr erfolgen. Ein an der Antriebsachse unkontrolliert gebremstes Fahrzeug ist auch für versierte Fahrer auf einer Fahrbahn mit vermindertem Haftreibungswert nicht oder nur schwer beherrschbar (C3). Die zu erwartenden Verletzungen im Fall einer Kollision sind ernsthaft und werden in die Ausprägung S2 eingestuft.

Für die Fehlzustände „Fahrerinformationssystem“ und „LV-Spannungsversorgung“ wurden keine Bewertungsmatrizen erstellt. Im Rahmen der Vorbereitung der Gefahrenanalyse wurde ersichtlich, dass von diesen Systemen kein Gefahrenpotenzial ausgeht bzw. Fehlfunktionen von jedem Fahrer erkannt und die Situation beherrscht werden kann. Ebenfalls wurde der Fehlzustand „Konventionelle Bremsanlage“ im Rahmen der Gefahrenanalyse nicht untersucht, da für diese Funktion Vorgaben und -vorschriften in ausreichendem Umfang bereits Anwendung finden.

Im Anschluss wurden die Matrizen zu den verbleibenden Fehlzuständen erstellt und jeweils kurz erläutert.

Für den Fehlzustand „Momentenanforderung“ wurden die Betrachtungsszenarien analog zum Fehlzustand Rekuperation gewählt (s. Tabelle 8). Ein Ausfall bzw. eine Unterfunktion der Momentenanforderung hat ähnliche Konsequenzen wie das aufgeführte Einsetzen der Rekuperation während eines Überholvorgangs. Kritisch ist auch die Unter- bzw. Überfunktion der Momentenanforderung während des Anfahrvorganges zu bewerten. Kann der

Szenario Fehler	1 Anfahren	2 Überholen	3 Kolonnenfahrt	4 A Abbremsen	5 μ vermindert
1 Ausfall	S0	S2 E3 C2	C0	Entfällt	C0
2 Unterfunktion	S3 E4 C2	S2 E3 C2	C0	Entfällt	C0
3 Überfunktion	S3 E4 C2	S2 E3 C1	S1 E4 C1	C0	S2 E2 C2

Tab. 8: Bewertungsmatrix Fehlerszenarien „Momentenanforderung“

Szenario Fehler	1 Sicherheitsabschaltung	2 Unterbrechung	3 Überholvorgang	4 μ verringert
1 Ausfall	S0	S0	Entfällt	Entfällt
2 Unterfunktion	S0	S0	Entfällt	Entfällt
3 Überfunktion	Entfällt	Entfällt	S3 E3 C3	S3 E2 C3

Tab. 9: Bewertungsmatrix Fehlerszenarien „Aktives Kurzschließen der Synchronmaschine“

Anfahrvorgang nicht im gewohnten Maß abgeschlossen werden oder kommt es zu einer ungewohnt erhöhten Momentvorgabe während des Anfahrvorgangs, sind Kollisionen mit dem Querverkehr möglich. Diese können auch bei geringer Relativgeschwindigkeit zu ernsthaften Verletzungen führen. Die Auswirkungen einer Überfunktion, d. h. eines ungewollten Beschleunigens des Fahrzeuges während einer Kolonnenfahrt, sind für die Mehrzahl der Fahrer durch Betätigen der Bremse eingrenzbare. Durch die häufig geringen Abstände beim Fahren in Kolonne sind allerdings auch ohne Betätigen der Bremse nur geringfügige Erhöhungen der Relativgeschwindigkeit und damit im Kollisionsfall nur leichte Verletzungen zu erwarten. Auch beim Fahren auf einer Fahrbahn mit vermindertem Haftreibungskoeffizienten ist eine ungewollte Momentenanforderung des Fahrzeugs durch das Betätigen der Reibbremse kontrollierbar. Allerdings ist dann die Gefahr einer fahrdynamischen Grenzsituation deutlich erhöht. Aus diesem Grund erfolgt eine Einstufung in die Ausprägung C2.

Ein aktives Kurzschließen der Synchronmaschine führt in Abhängigkeit vom Systemaufbau zu einem unregelmäßigen, sehr hohen Kurzschlussmoment der Antriebsmaschine (s. Tabelle 9). Für das aktive Kurzschließen wurden drei Szenarien betrachtet:

die Sicherheitsabschaltung, bei der der aktive Kurzschluss erwünscht ist. Eine Überfunktion des Fehlzustandes aktives Kurzschließen ist deshalb ebenso wie beim Szenario Unterbrechung der Hochvoltkomponenten zwischen Synchronmaschine und Energiespeicher nicht möglich. Da sich während der Fahrt keine Personen in der Nähe von Hochvoltkomponenten befinden können, sind auch durch einen Ausfall oder eine Unterfunktion keine Personenschäden zu erwarten. Für das dritte und vierte Szenario, den Überholvorgang sowie die Fahrt bei verringertem Haftreibungskoeffizienten, entfallen die beiden Fehlzustände Ausfall und Unterfunktion, da kein aktives Kurzschließen vorgesehen ist. Als sehr kritisch ist jedoch für beide Szenarien der Fehler einer Überfunktion zu bewerten. Durch das beschriebene hohe Kurzschlussmoment der Synchronmaschine kommt es zu einem unregelmäßigen Blockieren der Antriebsräder. Ein fahrdynamisch kritischer Zustand ist bei einem Überholvorgang bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten die Folge – insbesondere bei Blockade an der Hinterachse – die auch vom versierten Fahrer nicht zu kontrollieren ist. Durch den abrupten Abbruch des Überholvorgangs mit maximalem Bremsmoment der Antriebsmaschine sowie bei fahrdynamisch kritischen Situationen bei verringertem Haftreibungskoeffizienten sind schwerste Verletzungen zu erwarten. Bei der Fahrt mit verringertem Haftreibungskoeffizienten sinkt

Szenario Fehler	1 Parken	2 Parken, Isofehler	3 Stand	4 Überlandfahrt	5 Überholen
1 Ausfall	S2 E4 C1	S2 E1 C3	S3 E1 C3	S3 E1 C3	S0
2 Überfunktion	Entfällt	Entfällt	S0	Entfällt	S3 E3 C3

Tab. 10: Bewertungsmatrix Fehlerszenarien „Sicheres Abschalten HV-System“

jedoch im Gegensatz zum Überholvorgang die Aufenthaltswahrscheinlichkeit auf die Ausprägung E2, da das Szenario Überholvorgang häufiger eintritt als die Fahrt auf glatter Fahrbahn. Die Gefahrenabschätzung sinkt damit für das Szenario 5 im Vergleich zum Szenario 4.

Für den betrachteten Fehlzustand „Sicheres Abschalten des HV-Systems“ wurden verschiedene Szenarien bei stehenden und sich in Bewegung befindlichen Fahrzeugen betrachtet (siehe Tabelle 10).

Wird das HV-System bei einem geparkten Fahrzeug nicht getrennt, kann die Hochvoltbatterie durch die dauerhaft aktiven Hochvoltkomponenten tiefentladen werden, was bei lithumbasierten Batterien zum Brand führen kann. Durch die zeitliche Spreizung von der Brandentstehung bis zum vollständigen Brennen des Fahrzeugs besteht für Personen im Gefahrenbereich allerdings ausreichend Zeit, diesen zu verlassen. Der beschriebene Zustand bleibt damit in Bezug auf das Gefahrenpotenzial kontrollierbar. Kommt es während der Fahrt zu einem Ausfall der Abschaltfunktion, ist dieser Zustand bei einem Brand durch Kurzschluss nicht mehr kontrollierbar. Ebenso verhält es sich, wenn zusätzlich zum Ausfall der Abschaltfunktion ein doppelter Isolationsfehler vorliegt. Werden durch den Nutzer im Stand Wartungs- oder Reinigungsarbeiten durchgeführt, können bei einer nicht erfolgten Abschaltung des HV-Systems bei vorliegendem doppeltem Isolationsfehler Schädigungen wie von einem Strom- oder Brandunfall auftreten. Eine unvorhergesehene Trennung des HV-Bordnetzes während des Fahrbetriebs ist analog zur Überfunktion des Fehlzustandes als aktives Kurzschließen einzuschätzen. Eine Fahrt mit verringertem Haftreibungswert wurde nicht gesondert betrachtet. Die Gefahreneinstufung für das Szenario Überholvorgang beinhaltet bereits die für diesen Fall höchstmöglichen Ausprägungen. Bei der Eintrittswahrscheinlichkeit ist die Ausprägung E2 zu erwarten.

Szenario Fehler	1 Parken	2 Laden	3 Unfall
1 Betrieb außerhalb Spezifikation	S2 E4 C1	S2 E4 C1	S3 E1 C2

Tab. 11: Bewertungsmatrix Fehlerszenarien HV-Batterie

Tritt ein Fehler in der HV-Batterie durch eine Batterieüberlastung auf, können die daraus resultierenden Gefahren mit einer Unterfunktion der Momentenanforderung oder einer Überfunktion der Rekuperation gleichgesetzt werden. Kommt es im Aufbau der HV-Batterie zu einer Unterbrechung, entspricht dies den Fehlzuständen Trennung des HV-Bordnetzes. Wird die HV-Batterie außerhalb der Spezifikationen betrieben, ist generell mit einem Gefährdungspotenzial zu rechnen. Durch Selbstentladung kann die HV-Batterie tiefentladen werden, was bei lithumbasierten Batterien zum Brand führen kann. Dieser Fehlzustand ist auch während des Ladevorgangs durch Überladung möglich. Im Fall einer Kollision kann es bei lithumbasierten Batterien zu einer explosionsartigen Brandausbreitung kommen: Trotz ernsthafter Personengefährdung bleibt der Zustand kontrollierbar. Personen im Gefahrenbereich haben durch die Kapselung der Batterie in der Regel ausreichend Zeit, diesen zu verlassen (siehe Tabelle 11).

Nachdem der Bewertungsablauf für alle Fehlzustände durchgeführt und die identifizierten Matrizenfelder dahingehend bewertet wurden, ob eine potenzielle Quelle von Verletzungen, Gesundheits- oder Umweltschäden besteht, können die identifizierten Fehler/Szenarien-Kombinationen in die Ableitung von Untersuchungen und Vorgaben überführt werden.

Für die Umsetzung dieser Vorgehensweise wird erneut die Folge-Ursache-Tabelle der Simulation herangezogen, die nachfolgend erläutert wird.

Elektromaschine -> Rekuperationsleistung (Nicht ausführbar)

- TemperatursensorElektromaschine -> Sensiert Temperatur Elektromaschine (Nicht ausführbar)
- SpannungssensorEingangWR -> Sensiert Spannung am Eingang WR (Nicht ausführbar)
- RotorpositionssensorEM -> Sensiert Rotorlage EM (Nicht ausführbar)
- RotorpositionssensorEM -> Sensiert Rotorlage EM (Unterfunktion)
- RotorpositionssensorEM -> Sensiert Rotorlage EM (Überfunktion)
- Wechselrichter -> Erzeugt Strangspannung für EM (Nicht ausführbar)
- Wechselrichter -> Leistungshalbleiter (Nicht ausführbar)
- Wechselrichter -> Leistungshalbleiter (Überfunktion)
- ...

Bild 23: Auszug der Gesamtübersicht zum Fehlzustand Rekuperation

Für die Fehlzustände sind Hauptfunktionen definiert, die sich aus Unterfunktionen zusammensetzen. Diese werden von den zugehörigen Sensoren bzw. Aktoren ausgeführt und bestehen aus den im Kapitel 2.2 identifizierten Bauteilen und den zugewiesenen Funktionen im Antriebsstrang. Eine genaue Auflistung der Simulationsergebnisse, der auf die einzelnen Funktionen einflussnehmenden Bauteile und der Folge-Ursache-Schichtung ist aus der Gesamtübersicht in Anhang B ersichtlich.

In Bild 23 ist ein Auszug der Gesamtübersicht aus Anhang B zum Fehlzustand Rekuperation dargestellt.

Pro Zeile ist jeweils ein Bauteil mit der zugehörigen Funktion und dem Status angegeben, den die Funktion zum Zeitpunkt der Betrachtung angenommen hat. Anhand der Funktionstabelle zum Fehlzustand Rekuperation ist ersichtlich, dass über die Elektromaschine keine Rekuperationsleistung erbracht werden kann (Zustand nicht ausführbar), falls beispielsweise das Bauteil/die Funktionen Temperatursensor der Elektromaschine keinen Wert für die Temperatur an das System meldet oder der Spannungssensor am Eingang des Wechselrichters keine Spannung messen kann. Ebenso führt der Ausfall des Rotorpositionssensors (Nicht ausführbar) bzw. dessen Wertedrift (Unterfunktion/Überfunktion) dazu, dass die Elektromaschine keine Bremsenergie mehr rekuperieren kann.

Werden die in der Gesamtübersicht aufgezeigten Systemzusammenhänge beachtet, ergeben sich Prüfmöglichkeiten, die für eine Validierung der Einzelsysteme genutzt werden können, auch wenn diese im Rahmen der Hauptuntersuchung nicht einzeln prüfbar sind. Wird beispielsweise eine Prüfung des Systems Rekuperation durchgeführt und als funktionsfähig bewertet, können auch die zur Rekuperation notwendigen Untersysteme und Bauteile zum Zeitpunkt der Prüfung als funktionsfähig ein-

gestuft werden. Da diese auch von anderen Fahrzeugsystemen und -funktionen verwendet werden, ist es möglich, Teile von anderen Systemen und Funktion indirekt zu bewerten. Somit können Fahrzeugsysteme und -funktionen, die sich keiner direkten Prüfung unterziehen lassen, auch indirekt über die Bewertung ihrer einzelnen Komponenten geprüft werden.

5.3 Ergebnisse aus dem Feldversuch

Zur Teilnahme am Feldversuch haben sich 11.975 Fahrzeughalter der insgesamt 36.754 zugelassenen Fahrzeuge bereit erklärt. Von diesen Fahrzeugen konnten während des Feldversuchs 2.560 Fahrzeuge untersucht werden. Die Stichprobe des Feldversuchs umfasst somit 7 % der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge mit einem Erstzulassungsdatum zwischen dem 01.01.1985 und dem 01.10.2010 und kann als repräsentativ angesehen werden.

In Tabelle 12 sind die Untersuchungspunkte des Feldversuchs, in absteigender Fehleranzahl sortiert, neben der zugehörigen Fehlerquote und der Untersuchungsanzahl dargestellt. Die Anzahl der Untersuchungen liegt bei allen Untersuchungspunkten immer unter der Gesamtanzahl der Untersuchungen, da die entsprechenden Komponenten bzw. Funktionen nicht verbaut oder nicht einsehbar waren.

Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass die Ergebnisse für Fahrzeuge der Klasse L nicht repräsentativ sind. Sie werden in den folgenden Auswertungen nicht weiter berücksichtigt. Jedoch bekräftigen die hohe Anzahl an Lagerfehlern sowie der Hinweis, dass bei einem Fahrzeug die Vorderachsführungsgelenke bereits nach einer Laufleistung von 4.191 km ausgeschlagen waren, die Vermutung, dass die Fahrzeuge dieser Klasse teilweise nicht dem technischen Stand entsprechen.

Frage	Fehlerquote	Fehleranzahl	Untersuchungsanzahl
15. Sind Warnschilder auf den Hochvoltkomponenten vorhanden?	3,8 %	95	2.521
22. Sind Kabelführungen beschädigt?	2,8 %	70	2.545
19. Sind Ausführung und Zustand der Hochvoltkabel in Ordnung (orange ummantelt, Schirmung intakt, Scheuer- oder Bruchstellen sichtbar, nicht porös)?	2,4 %	60	2.535
23. Sind Hitzeschutzbleche, die Hochvoltkomponenten schützen, beschädigt oder fehlen?	1,3 %	33	2.468
7. Ist eine Bremswirkung auch ohne Bremskonditionierung gegeben? ¹	1,1 %	28	2.534
17. Sind Beschädigungen an Energiespeicher/Batteriegehäuse sichtbar?	1,0 %	26	2.492
17. Sind Beschädigungen an Spannungswandler sichtbar?	0,9 %	22	2.487
17. Sind Beschädigungen an Klimakompressor/Heizung sichtbar?	0,9 %	22	2.513
17. Sind Beschädigungen an Elektromaschine sichtbar?	0,9 %	22	2.516
21. Ausführung und Zustand der Stecker/Steckverbindungen (sitzen korrekt, sind intakt)?	0,7 %	18	2.483
13. Funktioniert der Rekuperationsvorgang ($v > 15$ km/h)?	0,5 %	13	2.517
16. Sind Verkleidungsteile der Hochvoltkomponenten intakt?	0,5 %	13	2.536
9. Sind Betätigungseinrichtungen (Getriebewählhebel, Fahrmodus-Taster o. Ä.) Hybrid-/Elektroantrieb voll funktionsfähig?	0,4 %	9	2.532
18. Zustand und Funktion des Kühlsystems für Hochvoltkomponenten und Hochvoltenergiespeicher in Ordnung?	0,3 %	8	2.423
8. Werden durch Kontroll-/Warnleuchten Fehler des Hochvoltsystems signalisiert?	0,2 %	6	2.544
17. Sind Beschädigungen an Ladekabel sichtbar?	2,9 %	4	137
17. Sind Beschädigungen an Ladeanschlüssen sichtbar?	2,6 %	4	154
24. Ist die Aufhängung der Elektromaschine beschädigt?	0,1 %	3	2.523
25. Sind Schwingenlager/Lenkkopflager noch intakt? (Nur Fahrzeuge der Klasse L!)	40,0 %	2	5
12. Ist Kühlung des Innenraumes durch Klimakompressor gegeben?	0,1 %	2	2.397
11. Ist Innenraumheizleistung gegeben (nur reine Elektrofahrzeuge)?	1,3 %	1	77
20. Sind leitfähige Teile des Hochvoltsystems sichtbar?	0,0 %	1	2.534
10. Wird die Fahrzeugrückmeldung aktiver Fahrzeugantrieb signalisiert (optisch/akustisch)?	0,0 %	0	2.535
14. Funktioniert die Anfahrsperrung bei fahrzeugseitig verbundenem Ladestecker?	0,0 %	0	89
26. Sind Auffälligkeiten/Ermüdungserscheinungen am Rahmen vorhanden? (Nur Fahrzeuge der Klasse L!)	0,0 %	0	6

¹ Nähere Erläuterungen zu der unerwartet geringen Mangelrate sind im 4. Textabschnitt dargestellt.

Tab. 12: Untersuchungsergebnisse des Feldversuchs

Des Weiteren ist ersichtlich, dass lediglich 154 reine E-Fahrzeuge untersucht wurden, was mit den geringen Zulassungszahlen zusammenhängt. Somit wäre eine Auswertung in Bezug auf das Ladekabel, den Ladeanschluss sowie die Anfahrsperrung ebenso nicht repräsentativ. Es wird aber trotz dieser Stichprobe mit geringem Datensatz deutlich, dass tendenziell der Ladestecker sowie -anschluss eine hohe Fehleranfälligkeit aufweisen.

Dies belegen auch die Kommentare der Sachverständigen im Fragebogen, die neben der Bemängelung von abgebrochenen Kunststoffteilen auch Kontaktabbrand sowie Kontaktkorrosion feststellten.

Der Feldversuch weist das Fehlen von Warnaufklebern als häufigsten Mangel an Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang aus. Dieser Mangel

stellt zwar keine direkte Gefährdung dar, kann jedoch dazu führen, dass bei Wartungs- oder Reparaturarbeiten die von den HV-Komponenten ausgehende Gefahr falsch eingeschätzt wird. Ebenso ist ersichtlich, dass die Kabelführungen und Hitzeschutzbleche sehr häufig beschädigt sind bzw. fehlen. Dies stellt ebenso keine direkte Gefährdung dar, führt allerdings zu einer stärkeren Belastung der Kabelisolation und bestätigt die hohe Fehlerquote bei Zustand und Ausführung der Hochvoltkabel. Die Auswertung der Kommentare zu diesem Untersuchungspunkt ergab, dass neben den erwarteten Fehlern wie Scheuerstellen, Marderbissen oder brüchiger Isolation auch die orange Farbe der Kabel durch das Übersprühen mit Unterbodenschutz teilweise nicht mehr erkennbar war.

Ein im Vorfeld nicht abzusehendes Ergebnis ist die relativ geringe Mängelquote bei der Frage nach der Abbremsung ohne Bremskonditionierung. Eine mögliche Ursache hierfür ist der hohe Anteil an Fahrzeugen von Toyota bzw. Lexus (1.976), bei denen ein elektrohydraulisches Bremssystem zum Einsatz kommt. Bei diesem System kann der Fahrzeugführer nicht zwischen der rekuperativen und mechanischen Abbremsung unterscheiden. Dies wirkt sich vor allem beim Abbremsen bis zum Stand aus, da mit fallender Geschwindigkeit immer weniger Bremsenergie rekuperiert werden kann und das elektrohydraulische Bremssystem automatisch den Hydraulikdruck der konventionellen Bremsanlage erhöht. Hinzu kommt, dass die Leistung der Elektromotoren bei den meisten Hybridfahrzeugen nicht ausreicht, um eine ausreichende rein rekuperative Bremsung bis zum Stillstand durchzuführen. Es ist davon auszugehen, dass die konventionelle Bremsanlage bei den hauptsächlich untersuchten Fahrzeugen ausreichend genutzt wird. Darüber hinaus bedeutet das Erreichen der gesetzlich geforderten Mindestabbremsung nicht, dass die von dem Fahrzeug maximal mögliche Abbremsung auch erreicht wird. Somit kann die These von verstärkter Degradation der konventionellen Bremsanlage – vor allem vor dem Hintergrund, dass zukünftig bei Serienfahrzeugen die Rekuperation über das Gaspedal steuerbar seien wird – zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht als widerlegt betrachtet werden. Hinzu kommen die Halterhinweise, die belegen, dass Reparaturen an der konventionellen Bremsanlage bei den untersuchten Fahrzeugen häufig nötig waren.

Bei der Frage nach Beschädigungen an den Hochvoltkomponenten wurden an ca. 1 % der untersuchten Fahrzeuge solche festgestellt. Aus den Kommentarfeldern geht hervor, dass neben geringfügigen mechanischen Beschädigungen auch der Austritt von Betriebsflüssigkeiten (Kühlflüssigkeit, Öl) festgestellt wurde.

Die Auswertung der Frage nach Ausführung und Zustand der Stecker und Steckverbindungen ergab, dass diese neben Korrosionsschäden auch Beschädigungen an den Lösesicherungen sowie Spritzwasserschutzvorrichtungen aufweisen. Die beschädigte Lösesicherung ist dabei besonders kritisch, da sich während der Fahrt die elektrische Verbindung trennen kann und dies einen plötzlichen Ausfall der Antriebsleistung bedingt. Die Korrosionsschädigungen stellen hingegen keine direkte Gefährdung dar, führen aber zu einer verstärkten Degradation der Isolationsfähigkeit der angrenzenden Hochvoltkomponenten.

Der Ausfall der Rekuperation wird vorrangig durch defekte Batterien hervorgerufen und ist insoweit kritisch, da sie meist Teil der Betriebsbremsanlage ist. Darüber hinaus wirkt sich der elektrische Antriebsstrang auf den Verbrauch und somit den CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs aus. Inwieweit dies bei den Umweltbetrachtungen im Rahmen der Hauptuntersuchung berücksichtigt werden muss, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht geklärt werden. Es wird empfohlen, hierzu gesonderte Untersuchungen durchzuführen.

Die Beschädigung von Verkleidungsteilen der Hochvoltkomponenten ist differenziert zu betrachten. Bei Abdeckungen oder Verkleidungen, die aus optischen Gründen angebracht sind, hat eine Schädigung, solange die sonst verdeckten Gehäuse in Ordnung sind, keinen Einfluss auf die Sicherheit des Fahrzeugs. Bei Beschädigung von schützend wirkenden Verkleidungen, wie beispielsweise dem Unterfahrschutz von Batterien oder Kabelkanälen für Hochvoltkabel, sind die geschützten Hochvoltkomponenten den schädigend wirkenden Umwelteinflüssen stärker ausgesetzt.

Von nicht funktionsfähigen Betätigungseinrichtungen wie beispielsweise dem Parkmodustaster geht in den meisten Fällen keine Gefährdung aus. Es wird jedoch klar, dass auch Taster einer Degradation unterliegen und dementsprechend Vorgaben für die sicherheitsrelevanten Betätigungseinrichtungen erstellt werden müssen.

Wichtig für die Untersuchung der Hochvoltkomponenten sind der Zustand sowie die Funktion des Hochvoltkühlsystems. Hier wurden Undichtigkeiten im System, vor allem bei den Wasserpumpen, festgestellt. Dann ist die ausreichende Kühlung der Hochvoltkomponenten nicht mehr gewährleistet, was zur plötzlichen Leistungsreduzierung bis hin zum kompletten Abschalten des elektrischen Antriebsstrangs führen kann.

Bei Auswertung der durch die Kontroll- und Warnleuchten signalisierten Fehlzustände ist aufgefallen, dass an zwei Fahrzeugen Isolationsfehler signalisiert wurden. Somit werden zum einen die These zur Anfälligkeit der Isolation und zum anderen die Notwendigkeit des Isolationswächters bestätigt.

Die Komponenten der Aufhängung der Elektromaschine sowie der Klimakompressor lassen sich nach Auswertung der Feldversuchsdaten als unkritisch einstufen. Diese Aussage kann auch für die frei liegenden Hochvoltkomponenten getroffen werden, da diese lediglich bei einem Fahrzeug sichtbar waren. Wichtig ist, dass sowohl ein Berühren als auch der Kontakt zwischen den sichtbaren leitfähigen Teilen eine sehr hohe Gefährdung darstellen. Bei dem untersuchten Fahrzeug war das originale Ladegerät abgeklemmt. Diese waren an den Klemmstellen nicht isoliert, und die originalen Kabel wurden beim Ladevorgang an ein externes Ladegerät angeschlossen. Dies zeigt den nachlässigen Umgang mit dem Hochvoltsystem seitens einiger Nutzer. Hinzu kommt die anwachsende Zahl von Foren, in denen sich Halter von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang austauschen. Hier ist eine stärkere Beobachtung notwendig, um die Manipulationsvielfalt zu überblicken und entsprechende Prüfhinweise erstellen zu können.

Die HU-Ergebnisse zeigen, dass die Mängelhäufigkeit in allen Hauptbaugruppen der Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen tendenziell geringer ist. Dies trifft auch auf die Mängel der Hauptbaugruppe 1 (Bremsanlage) zu. Bei diesen Betrachtungen wurde eine Stichprobe der gesamten HU-Ergebnisse des 2. Halbjahres 2012 ausgewertet und Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb denen mit elektrischem Antriebsstrang gegenübergestellt. Mit einbezogen wurde das Fahrzeugalter, die Laufleistung blieb unberücksichtigt. Zum heutigen Zeitpunkt kann bei dieser Datenbasis nicht von einer verstärkten Degradation der Bremsanlage durch Nichtnutzung ausgegangen werden. Auf-

grund der geringen Marktdurchdringung sind diese Aussagen mit Vorbehalt zu betrachten. Um das Verhalten der konventionellen Bremsanlage bei diesen Fahrzeugen sicher einschätzen zu können, ist eine Auswertung der zukünftigen HU-Ergebnisse notwendig.

5.4 Auswirkungen von Manipulationen an ausgewählten sicherheits- und umweltrelevanten Bauteilen

Manipulationen an Fahrzeugen der Klasse M und N

Das Außerkraftsetzen von einschränkenden Sicherheitsmechanismen ist bei Fahrzeugen der Klassen M und N als besonders kritisch zu bewerten, da hier das Sicherheitsniveau des Fahrzeugs direkt beeinflusst wird. Ein sehr wichtiger Sicherheitsmechanismus ist der Isolationswächter. Ein Außerkraftsetzen dieses Bauteils ist notwendig, wenn das Fahrzeug trotz eines einpoligen Isolationsschadens weiterbetrieben werden soll, ohne diesen zu beheben. Technisch und ohne Einschränkungen ist dies durch die galvanische Entkopplung des HV-Netzes vom 12-V-Bordnetz möglich. Große Gefahr besteht dann aber durch einen direkten (z. B. Stromschlag) oder indirekten (z. B. Verbrennungen durch Lichtbogen bei Kurzschluss) Personenschaden aufgrund der Spannung des Hochvoltsystems.

Der Isolationswiderstand kann mit einem aktiven und einem passiven Messverfahren ermittelt werden. Das passive Messverfahren nutzt eine Widerstandskaskade zwischen den beiden Leitern des HV-Bordnetzes und der Fahrzeugkarosserie, um den Isolationswiderstand bestimmen zu können. Beim aktiven Messverfahren wird ein Spannungsimpuls mit Bezug zur Fahrzeugkarosserie in die Leiter des HV-Bordnetzes eingebracht und die Flanken ausgewertet. Beide Messverfahren konnten so manipuliert werden, dass die Eigendiagnose des Fahrzeugs keine Fehler bzw. unplausible Werte anzeigte. Für Manipulation dieser Art sind sehr gute System- und Elektronikkenntnisse nötig, die Materialkosten sind gering.

Weiterhin ist es möglich, die Kommunikation zwischen Isolationswächter und dem Steuergerät, das die HV-Schütze schaltet, zu manipulieren. Dazu müssen der Isolationswächter und das Steuergerät, das die Schützsteuerung realisiert, örtlich vonei-

ander getrennt sein. Zur Kommunikationsmanipulation müssen die relevanten Daten zunächst identifiziert und interpretiert werden, um anschließend das Verhalten nachbilden zu können. Der Aufwand dieser Manipulationsmöglichkeit hängt stark von der eingesetzten Kommunikationsart ab. Wird ein Datenbus verwendet, ist neben Fachwissen auch das entsprechende Equipment notwendig. Findet die Kommunikation nicht über einen Datenbus statt, ist die Kommunikationsmanipulation stark vereinfacht.

Beide aufgeführten Manipulationen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, eine verbaute Isolationsüberwachung zu manipulieren und somit das Sicherheitsniveau des Fahrzeugs erheblich zu verringern. Welchen Aufwand und wie viel Fachwissen eine solche Manipulation benötigt, hängt stark vom jeweiligen Fahrzeug ab. Somit kann es bei einigen Fahrzeugen durchaus günstiger sein, den Isolationswächter zu manipulieren, anstatt den Isolationsfehler beheben zu lassen. Hinzu kommt, dass der Aufbau eines Isolationswächters einen alterungsbedingten Funktionsausfall ohne Diagnosemöglichkeit zulässt. Dies ist als besonders kritisch zu bewerten, da ein Auftreten der Isolationsfehler vom Fahrzeug nicht mehr detektiert werden kann und der Nutzer über diesen gefährlichen Systemzustand nicht informiert wird. Somit ist nicht davon auszugehen, dass die galvanische Entkopplung von Hochvolt- und 12-V-Bordnetz über die gesamte Fahrzeuglebensdauer erhalten bleibt.

Manipulationen zur Leistungssteigerung wurden bei Fahrzeugen der Klassen M und N nicht durchgeführt, da mit der Herangehensweise wie bei der Isolationswächtermanipulation gleiche Ergebnisse erwartet werden können. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass leistungssteigernde Manipulationen ebenso durchgeführt, aber von der Fahrzeugeigendiagnose nicht detektiert werden können. Die Auswirkungen von leistungssteigernden Manipulationen an Fahrzeugen der Klasse M und N sind analog zu denen bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen zu sehen. Der Energiespeicher wird zwar höher belastet und altert somit schneller, aber durch die vorhandene Einzelzell- und Temperaturüberwachung ist nicht zu erwarten, dass der Energiespeicher in einen kritischen Zustand gelangt.

Manipulationen an Fahrzeugen der Klasse L

Bei Fahrzeugen der Klasse L mit Geschwindigkeits- oder Leistungsbegrenzung ist ein großes Interesse am Umgehen dieser Begrenzungen zu beobachten.

Die häufigste Manipulation ist das Aufheben der Geschwindigkeitsbegrenzung und wird vorwiegend in der Klasse L1e sowie bei Pedelecs angewendet. Diese Manipulation kann durch mechanische sowie elektronische Veränderungen an den Fahrzeugen realisiert werden. Bei Systemen, die die Geschwindigkeit über einen externen Sensor ermitteln, können zum einen die Sensorposition und zum anderen der übertragene Wert verändert werden. Wird die Geschwindigkeit über die Drehzahl der Elektromaschine ermittelt, lässt sich das Übersetzungsverhältnis ändern. Dies ist auch bei Radnabenmotoren durch den Einbau (Einspeichen) des Motors in ein größeres Rad möglich (z. B. Motor für ein 20“-Rad in ein 28“-Rad einbauen). Zudem ist die Geschwindigkeitsmanipulation bei Systemen ohne externe Geschwindigkeitsmessung mit der Erhöhung der Systemspannung möglich. Diese Manipulation steigert auch die Systemleistung und ist als besonders kritisch einzustufen, da die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs in den meisten Fällen nicht für die anliegende Spannung ausgelegt sind. Die eleganteste Manipulationsmöglichkeit bietet der Eingriff in die Steuerungssoftware. Hierbei können zum einen alle Parameter so verändert werden, dass das System an seinen Leistungsgrenzen arbeitet; zum anderen lässt sich ein solcher Eingriff im Bedarfsfall sehr schnell und einfach rückgängig machen.

Bei Betrachtung der Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhung an Fahrzeugen der Klasse L1e spielen sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Komponenten eine wichtige Rolle.

Die mechanischen Komponenten bilden hier den Hauptteil. Der konstruktiv einfache Aufbau der Fahrzeuge (Rahmen, Federungs-/Lenkungselemente sowie die Bremsen) und die zum Teil schlechte Verarbeitungsqualität bringen auch nicht manipulierte Fahrzeuge an die Leistungsgrenze ihrer Fahreigenschaften.

Diese Fahreigenschaften werden durch die Erhöhung der Geschwindigkeit deutlich überschritten. Die Bauteile Rahmen, am deutlichsten aber die Federungs-/Lenkungselemente und Bremsen halten den Belastungen einer Teilnahme im Straßenver-

kehr nicht mehr stand. Das Sturz- und Unfallrisiko steigt erheblich.

Sehr deutlich zeigen sich die Folgen der Manipulationen bei Pedelecs. Eine Folge davon ist das „Lenkerschlagen“. Der Fahrer spürt dies als eine schlagartige Drehung der Gabel und des Lenkers um die Lenkachse bis zum vollen Lenkeinschlag. Je nach Dämpfung der Vorderradführung schwingt dieser Ausschlag mit einer Frequenz von mehreren Hertz mehr oder weniger lange nach. Im ungünstigsten Fall, wenn die Pendelbewegung mit einer Resonanzfrequenz der Vorderradführung erfolgt, kommt diese gar nicht oder nur sehr langsam zur Ruhe. Die Folge ist in den meisten Fällen ein Sturz.

Ähnlich verhält es sich bei den elektrischen Komponenten: Kaum ein Pedelec erfüllt momentan die Anforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Durch Manipulation der Fahrzeuge erhöht sich auch das Risiko, dass es sich, ohne dass der Fahrer es will, selbstständig bewegt. Dies bedeutet: Das Fahrzeug beschleunigt weiter, obwohl der Fahrer nicht mehr tritt. Ebenso erhöht sich das Risiko, dass die elektromagnetischen Felder eines Funkgeräts oder anderen Fahrzeugs ein Pedelec ohne Zutun des Fahrers anfahren lassen.

Das Deaktivieren der Geschwindigkeitsbegrenzung führt allerdings in den meisten Fällen nicht zu einer erheblichen Geschwindigkeitssteigerung, da die installierte Leistung meist an die Geschwindigkeit angepasst ist. So kann beispielsweise durch die maximale Leistung von 250 W beim Pedelec 25 allein durch den Elektromotor eine Geschwindigkeit von ca. 30 km/h erreicht werden (bei einer dem Hollandrad ähnlichen Bauform). Kommt die Leistung des Fahrers von ca. 150 W (entspricht in etwa der Dauerleistung eines „Hobbyradfahrers“) hinzu, wird eine Geschwindigkeit von ca. 35 km/h erreicht. Bei Fahrzeugen der Klasse L1e kann man mit einer Motorenleistung von 1.790 W (Govecs 1.4 S) eine Maximalgeschwindigkeit von ca. 65 km/h erreichen. Es wird deutlich, dass neben dem Manipulieren der Geschwindigkeitsbegrenzung auch leistungssteigernde Manipulationen durchgeführt werden. So ist es problemlos möglich, Motoren für Pedelecs mit einer Dauerleistung von 1.000 W zu bekommen, die sich äußerlich kaum von den 250-W- oder 500-W-Motoren unterscheiden. Ebenso kann der Motor bei Fahrzeugen der Klasse L1e ausgetauscht werden. So sind mit der maximal in der Klasse L1e erlaubten Leistung von 4 kW Geschwindigkeiten von ca. 85 km/h möglich.

Die höhere Leistung und das damit einhergehende höhere Drehmoment von manipulierten Fahrzeugen wirken sich am stärksten auf die Aufnahme- und Federpunkte der Hinterradschwinge (Schwingtriebssatz) und der Federelemente zu Schwinge und Rahmen aus. Selbst an vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, bei denen das max. Drehmoment bei höheren Drehzahlen zur Verfügung steht, sind die Aufhängungspunkte schon bei Original-Fahrzeugen sehr stark beansprucht und teilweise überlastet. Beim Elektromotor steht das Drehmoment sofort zur Verfügung, wodurch ein manipuliertes Fahrzeug permanent über den Leistungsgrenzen seiner Fahreigenschaften bewegt wird. Das kann zu Brüchen von Aufhängungspunkten an Rahmen, Schwingen sowie Federungs- bzw. Lenkungselementen führen. Aber auch die mechanische Überbeanspruchung von Bremsen, Felgen, Lenkkopflager und Radlager ist eine Folge.

In diesem Zusammenhang ist auch auf ein unterschiedliches Sicherheitsbewusstsein der Fahrzeugführer/-halter hinzuweisen. Im Gegensatz zu Fahrzeughaltern der Klasse L3e mit einem sehr hohen Sicherheitsbewusstsein (Wartung der Fahrzeuge wird regelmäßig vorgenommen) haben Fahrzeughalter der Klasse L1e ein geringeres Sicherheitsbewusstsein und warten ihre Fahrzeuge unregelmäßig.

Eine Manipulation von einschränkenden Sicherheitsmechanismen ist bei den Fahrzeugen der Klasse L nicht notwendig, da trotz Verbaus von Hochvoltssystemen bei den untersuchten Fahrzeugen keine installiert sind.

Neue Methoden der Manipulation

Neben den beschriebenen Manipulationen, die auch bei dem konventionellen Antriebsstrang zu beobachten sind, sind bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang neue Manipulationen möglich. So werden bereits heute die Batteriezellen durch leistungsstärkere Typen ersetzt, um die Reichweite zu erhöhen oder die Kosten eines notwendigen Batterietauschs zu verringern. Kritisch ist hierbei, dass meist lithiumbasierte Batterietypen mit selbst entworfenen BMS eingesetzt werden. Inwieweit die eingesetzten Komponenten den Sicherheitsanforderungen entsprechen, kann nicht bewertet werden. Vor allem lithiumbasierte Batterien mit hoher Leistungs- und/oder Energiedichte sind bezüglich ihrer Sicherheit trotz bestandener Zelltests eher kritisch zu sehen, da das Verhalten einer

einzelnen Zelle nicht zwingend auf ihr Verhalten im Zusammenspiel mit mehreren Zellen übertragbar ist. Darüber hinaus ist es aufgrund der hohen gespeicherten elektrischen Energiemenge sowie der hohen Spannungslage möglich, auch leistungsinensive elektrische Verbraucher wie z. B. elektrische Heizgeräte in das Fahrzeug zu verbauen. Bei derartigen Manipulationen findet nicht nur ein Eingriff in die Hochvoltkomponenten statt. Elektrische Betriebsmittel, die für einen stationären Gebrauch konzipiert und geprüft sind, werden somit in einer Umgebung installiert, in der sie völlig anderen Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Eine Vielzahl von Manipulationen an Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang ist trotz der geringen Marktdurchdringung bereits in diversen Foren zu finden (z. B. unter <http://www.elektro-auto.net/>).

6 Erarbeitung und Beschreibung allgemeiner und spezieller Anforderungen an die periodisch technische Überwachung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen

6.1 Ableitung von Untersuchungen und Vorgaben der sicherheits- und umweltkritischen Bauteile, selbstständigen technischen Einheiten sowie Systeme

Basis für die Festsetzung von Untersuchungspunkten und Vorgaben sind die unter Kapitel 5.2 zusammengestellten sicherheits- bzw. umweltkritischen Bauteile sowie die Systeme und selbstständigen technischen Einheiten.

Eine weitere Grundlage für die Festsetzung von Untersuchungspunkten und Vorgaben bildet die unter Kapitel 5.3 dargestellte Auswertung der in AP1 erstellten Fragebögen. Diese liefert Aussagen zum Ausfall von Bauteilen bzw. Systemen im realen Betrieb und gibt Aufschluss über die Durchführbarkeit der vorgeschlagenen Prüfungen.

Die Überprüfung sämtlicher sicherheits- bzw. umweltkritischer Bauteile sowie der Systeme und selbstständigen technischen Einheiten ist im Rahmen der Hauptuntersuchung (HU) nur bedingt möglich oder kaum praktikabel. Deshalb ist die gezielte

Prüfung geeigneter Funktionen sinnvoll, die eine indirekte Überprüfung von Bauelementen (Sensoren/Aktoren) erlauben. Sensoren und Aktoren werden in der Regel für mehrere Funktionen genutzt. Mit Hilfe der Folge-Ursache-Strukturtafel (s. Anhang B) soll dies kurz erläutert werden:

In dieser Exceltabelle „Ausfallursachen_Hauptfunktionen.xls“ sind identische Funktionskomponenten der 2. Funktionsebene mit einer einheitlichen Farbe für alle Hauptfunktionen gekennzeichnet. Sensoren und Aktoren, deren Funktion beispielsweise durch eine Wirkprüfung des Rekuperationsverhaltens überprüft werden können, werden auch für andere Hauptfunktionen verwendet. Somit kann durch Prüfung einer geeigneten Hauptfunktion die Funktion mehrerer Hauptfunktionen sichergestellt werden. Die Tabelle gibt eine Übersicht über die Möglichkeit der verknüpften Wirkprüfung von Hauptfunktionen und ist damit die Grundlage eines Teils der vorgeschlagenen Vorgaben.

Dennoch sind einige Funktionen nur über eine einzelne Wirkprüfung bewertbar.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen eine Übersicht der möglichen Untersuchungen bei Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang. Es erfolgt eine Unterteilung in nicht untersuchungsrelevante Fahrzeugfunktionen, bereits bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen enthaltene Untersuchungspunkte und von der FSD zur Verfügung gestellte bzw. neu zu entwickelnde Prüfvorgaben für Fahrzeuge mit Elektro- bzw. Hybridantrieb.

Nicht untersuchungsrelevante Fahrzeugfunktionen

Die Sicherheitslinie muss während der HU nicht geprüft werden, da sie lediglich das Öffnen von Hochvoltkomponenten und -verbindungen detektiert und somit nur für den Werkstatt- und Servicebetrieb von Relevanz ist. Dies setzt das Spannungsfreischalten und das anschließende Feststellen der Spannungsfreiheit voraus. Bei einem Defekt der Sicherheitslinie stellt diese z. B. die „Öffnung der Sicherheitslinie“ fest, obwohl keine Öffnung vorliegt. Hier kann die Fahrbereitschaft nicht mehr hergestellt werden und führt zu einem Mangel. Ist die Sicherheitslinie z. B. durch ein abgezogenes Hochvolt-Kabel oder eine Gehäuseabdeckung geöffnet und das System gibt keine Fehlermeldung aus, wird dies bereits bei der Zustands-, Funktions- und Wirkprüfung der Komponenten detektiert und bemängelt.

Ähnliches gilt für die pyrotechnische Sicherung. Diese löst im Fall einer Kollision die Hochvolt-Schütze, und das Fahrzeug ist nicht mehr einsatzbereit. Dieses Verhalten ist vergleichbar mit dem der Airbagkomponenten, auf die die Hersteller eine lebenslange Garantie auf Funktion und Haltbarkeit geben. Demzufolge kann eine Bewertung analog zur Bewertung bei Airbagkomponenten erfolgen.

Die Untersuchung des DC-DC-Wandlers für das 12-V-Bordnetz ist ebenfalls als nicht relevant einzustufen, da dieser wie der Bordnetz-Generator bei Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb zu beurteilen ist und kein erhöhtes Gefährdungspotenzial darstellt.

Konventionelle Prüfinhalte

Das Airbagsystem wird seit einem längeren Zeitraum im Rahmen der HU geprüft, und die Methoden dazu sind in den Prüfabläufen integriert und etabliert. Bei der Bremsenprüfung wird bereits neben der Zustands- auch eine Funktions- und Wirkprüfung durchgeführt. Durch die Bezugsbremskraftprüfung mit dem HU-Adapter 21 PLUS (HUA) können zukünftig aussagekräftiger die Reibpaarung von Betriebs- und Hilfsbremsanlage sowie die Bremskraftverteilung beurteilt werden, sobald die Bezugsbremskraftwerte für das entsprechende Fahrzeug vorliegen.

Der Sachverständige bewertet die Warn- und Kontrollleuchten wie bei klassischen Fahrzeugen und zieht Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit der einzelnen Komponenten bzw. Systeme im Fahrzeug.

Bestehende und zukünftige Inhalte der Vorgaben für den elektrischen Fahrzeugantrieb

Die Wirkprüfung des Beschleunigungs- und Rekuperationsvorgangs soll bei der HU berücksichtigt werden. Aktuell kann das Beschleunigungs- und Rekuperationsverhalten (für Bremsen der Kategorie B nach ECE-R 13-H) nur bei der Prüffahrt beurteilt werden. Dazu wird über das Fahrpedal beschleunigt, für die Rekuperation das Fahrpedal zunächst freigegeben und anschließend das Bremspedal betätigt. Die Beurteilung erfolgt jedoch für ersteres rein subjektiv und für die Bremsenergieerückgewinnung rein optisch anhand von Anzeigeelementen des Fahrzeugs. Zukünftig ist eine Bewertung des Motorstroms der Elektromaschine über

Diagnosedaten denkbar, indem die ausgelesenen Werte mit Referenzwerten verglichen werden. Auch für die Rekuperation ist eine Referenzwertprüfung möglich. Hierbei sollen sowohl Bremsen nach Kategorie A als auch nach Kategorie B der ECE-R 13-H beurteilt werden, da die verbauten Sensoren und Aktoren, die auch andere Systeme bzw. Funktionen beeinflussen, geprüft werden können. Somit lassen sich Teile von Systemen wie das aktive Kurzschließen der Elektromaschine indirekt überprüfen.

Um bei der HU über die Diagnoseschnittstelle HU-relevante Messwerte und den Status auszulesen sowie Aktivierungen auszuführen, ist ein universelles Diagnosegerät notwendig. Dieses muss in der Lage sein, die in der Automobilindustrie für Diagnosezwecke eingesetzten Busphysiken bedienen und Diagnoseprotokolle interpretieren zu können. Aktuell kommen CAN-Bussysteme in ihren Ausprägungen High-Speed, Low-Speed und Single-Wire sowie K-Line in der Varianz mit und ohne zusätzliche L-Line zum Einsatz. Für die nicht abgasrelevanten Steuergeräte gibt es für die Fahrzeugdiagnose keine Vorschrift, auf welchen Pins der OBD-Schnittstelle welche Protokolle laufen müssen. Dies führt dazu, dass die Hersteller diese Freiheitsgrade entsprechend nutzen und es eine Vielfalt von Pinkombinationen gibt. Diese müssen frei konfigurierbar sein, um einen markenübergreifenden und -unabhängigen Einsatz sicherzustellen. Des Weiteren ist es notwendig, dass die Übertragungsgeschwindigkeit für die verschiedenen Diagnoseprotokolle einstellbar ist, um auch an dieser Stelle auf die Vielfalt flexibel reagieren zu können. Für den Einsatz bei der Hauptuntersuchung muss das Diagnosegerät neben den oben erwähnten Eigenschaften robust, zuverlässig und einfach in der Bedienung sein. Ein Beispiel für ein Diagnosegerät, das diesen Anforderungen entspricht, ist der HU-Adapter 21 PLUS.

Ein weiterer Untersuchungspunkt, bei dem der Sachverständige bei der Prüfung mittels Diagnosegeräts unterstützt werden muss, ist die Bewertung der Spannungsänderung des Hochvolt-(HV-)Systems beim Herstellen der Fahrbereitschaft und der vorangegangenen Vorladung. Hierbei werden über die Diagnoseschnittstelle die Werte eines Spannungssensors (nicht der der Hochvolt-Batterie) ausgelesen und der Spannungsverlauf durch den aaSoP bzw. PI bewertet. Diese Prüfung mittels Diagnosegerät, kann nicht durch eine konventionelle Vorgabe ersetzt und der

Spannungswert auch nicht über ein Alternativverfahren ermittelt werden.

Um die Kühlung der Hochvolt-Komponenten bzw. konkret der Hochvolt-Batterie zu prüfen (erhöhtes Gefährdungspotenzial durch Überhitzen der Hochvolt-Batterie oder durch plötzliche Momentenwegnahme beim Beschleunigen), wird derzeit z. B. bei flüssigkeitsgekühlten Systemen die Kühlleistung der Fahrzeugklimaanlage durch Anforderung von Kühlleistung geprüft. Objektiver wird die Beurteilung, wenn mit einem Diagnosegerät in Zukunft die Werte von Temperatursensoren aus dem Inneren der Hochvolt-Batterie bzw. von anderen Hochvolt-Komponenten angefragt werden können. Mit Hilfe von Referenzwerten ist dann einzuschätzen, ob der Sensor aktiv ist und ob dieser Temperaturänderungen erkennt. Zusätzlich wird geprüft, ob Lüftungsgitter (Zu- und Abluft) zur Belüftung der Hochvolt-Batterie blockiert sind. Auch hier kann ein Diagnosegerät genutzt werden, um die Batterielüfter anzu steuern. Über den gefühlten Luftstrom an Ein- und Auslässen bzw. über die ausgelesene Drehzahl wird die Funktionstüchtigkeit ermittelt. Die Drehzahl lässt sich auch bei flüssigkeitsgekühlten Hochvolt-Batterien für Umwälzpumpen des Kühlkreislaufs auslesen. Momentan wird das Kühlsystem – die Kühlmittelstände von Ausgleichsbehältern – optisch überprüft, ebenso die Schläuche und die Kühlflächen

Auch für das Batteriemanagementsystem, das den Zustand der Hochvolt-Batterie überwacht, wird die Prüfung erst mit einem Diagnosegerät möglich. Dann kann z. B. das Balancing der Batteriezellen beurteilt werden, indem die einzelnen Absolutwerte miteinander verglichen und Abweichungen einzelner oder mehrerer Zellen ermittelt werden. Zusätzlich sind das Auslesen und Bewerten (mit Hilfe vorgegebener Grenzwerte) von Zellspannungen und Zellinnenwiderständen der Batteriezellen, der Temperatursensoren sowie der Stromsensoren möglich. An dieser Stelle sei bemerkt, dass die Prüfung über Diagnosedaten hier ebenfalls nicht durch Alternativprüfungen ersetzt werden kann, denn für die Bereitstellung der Temperaturwerte besteht derzeit kein Alternativverfahren.

Die Hochvoltbatterie selbst kann nur über die Sichtprüfung der äußeren Ummantelung und Schutz einrichtung (wie z. B. spezielle Verstärkungen und Träger) begutachtet werden. Auch bei den Hochvoltkabeln, -steckern und Ladeanschlüssen kann die Mangelfreiheit nur durch eine optische Begutach-

tung festgestellt werden. Das von der ECE-R 100 geforderte Warnzeichen auf den Hochvoltkomponenten lässt sich ebenfalls nur visuell überprüfen.

Ein weiterer wichtiger Untersuchungspunkt ist die Gewährleistung der Sicht bei kalten Umgebungstemperaturen oder hoher Luftfeuchte (bedingt durch Niederschlag) durch die Innenraum- oder Scheibenheizung. Diese kann subjektiv durch Anforderung der Heizleistung oder objektiv über ein Diagnosegerät mit einem Soll-/Istwertvergleich ermittelt werden.

Bei vorhandener Ladeeinrichtung (Ladekabel) sollte die Funktionsfähigkeit der Anfahrsperrung kontrolliert werden. Ist das Fahrzeug mit der Ladeeinrichtung verbunden, darf es nicht anfahren können. Funktioniert die Anfahrsperrung nicht, kann es dann zu Beschädigungen an der Ladeeinrichtung, d. h. dem fahrzeugseitigen Ladeanschluss, am Ladekabel und/oder an der externen Stromquelle kommen.

Auch das Ladegerät, sofern es ein externes Gerät ist, kann bei der Prüfung optisch begutachtet und auf Eignung bzw. Zulässigkeit für das vorgestellte Fahrzeug geprüft werden. Es ist möglich, dass der Einsatz einer ungeeigneten bzw. nicht zulässigen oder defekten externen Ladeeinrichtung zu Beschädigungen der Hochvolt-Batterie führen kann.

Die Beurteilung des Isolationswächters ist notwendig, um das hohe Sicherheitsniveau der Hochvolt-Fahrzeuge zu gewährleisten. Eine Prüfung ist technisch im Rahmen der HU nicht möglich, da die ordnungsgemäße Funktionsweise nur durch das Herbeiführen eines Isolationsfehlers und gleichzeitige Beobachtung der Fahrzeugreaktion sicher bewertet werden kann. Dieses Vorgehen würde sowohl für den Prüfer als auch für das zu prüfende Fahrzeug eine nicht akzeptable Gefährdung darstellen. Somit muss ein Prüfmodus gefordert werden, der gezielt einen Isolationsfehler im Hochvoltbordnetz aufschaltet und dann durch das Fahrzeug detektiert wird. Das Gleiche gilt für die Zwischenkreiskondensatoren, da diese die Spannungsglättung der Spannungswandler vornehmen. Der Ausfall oder die Alterung der Zwischenkreiskondensatoren führt zur zunehmenden Belastung der Hochvoltbatterie sowie zur erhöhten Störaussendung von elektromagnetischen Wellen, wodurch die Anforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) unter Umständen nicht mehr eingehalten werden. Daher sollte es ermöglicht werden, die Werte der

Zwischenkreiskondensatoren über die Diagnose-schnittstelle auszulesen und zu bewerten bzw. ein alternatives Bewertungsverfahren einzuführen (s. Kapitel 6.3).

Während der Recherchen für die geplanten Manipulationsuntersuchungen stellte sich heraus, dass verstärkt Manipulationen in Foren diskutiert und beschrieben werden (s. Kapitel 5.4). Um das hohe Sicherheitsniveau der Fahrzeuge über die gesamte Lebensdauer zu erhalten, sind im Rahmen von Versuchen auch zukünftig Manipulationen an Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang experimentell auszuführen und zu bewerten. Die so gewonnenen Ergebnisse sind dann in Vorgaben oder Prüfhinweisen umzusetzen, damit manipulierte Fahrzeuge bei der PTI auffällig werden.

6.2 Untersuchungen zu Auswirkungen auf die HU- und SP-Vorschriften

Abschließend wurde geprüft, welche Auswirkungen die erarbeiteten Untersuchungen und Prüfvorgaben auf das derzeit gültige Regelwerk haben werden. Hierzu erfolgt die Prüfung auf notwendige Änderungen in der StVZO:

- § 19,
- Beispielkatalog – Änderungen an Fahrzeugen § 19,
- § 29,
- Anlage VIII,
- Anlage VIIIA,
- Anlage VIIC,
- Anlage VIID,
- HU-Richtlinie Mängel inklusive einheitlichem Mangelbaum,
- Vorgaben-Richtlinie,
- HU-Bremsenrichtlinie,
- HU-Datenübermittlungsrichtlinie,
- SP-Richtlinie,
- Rahmenlehrpläne für aaSoP/PI.

Im Detail werden folgende Änderungen vorgeschlagen:

6.2.1 Änderungen im § 19 StVZO

(Erteilung und Wirksamkeit der Betriebserlaubnis)

Zur Erteilung der Betriebserlaubnis für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge müssen grundsätzlich die Vorschriften aus Richtlinie 2002/24/EG eingehalten werden. In dieser Richtlinie wird in Anhang 1, Rubrik 19 die Einhaltung der Maßnahmen gegen unbefugte Eingriffe an Kleinkrafträdern und Kraft-rädern aus Richtlinie 97/24/EG, Kapitel 7 gefordert. Diese Maßnahmen sind nicht mehr auf dem aktuellen technischen Stand und müssen überarbeitet werden. Hierbei sind die durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges möglichen Manipulationen zu berücksichtigen.

§ 19 muss geändert werden, sobald die Richtlinien angepasst sind.

Änderungen im Beispielkatalog – Änderungen an Fahrzeugen § 19

(Beispielkatalog für die Änderungen an Fahrzeugen und deren Auswirkungen auf die Betriebserlaubnis von Fahrzeugen)

Mit dem Beispielkatalog zu Änderungen an Fahrzeugen und ihre Auswirkung auf die Betriebserlaubnis von Fahrzeugen (§ 19 Absatz 2, 3, 4 und 5 StVZO) werden in Teil A in der vorliegenden Fassung Änderungen an Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang abgedeckt.

Da bei Änderungen am Hochvoltsystem von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang eine Gefährdung von Verkehrsteilnehmern zu erwarten ist, empfiehlt sich eine Erweiterung von Teil B des Beispielkataloges um die Gruppe der Hochvoltkomponenten. Gefahrenpotenziale liegen insbesondere in der Änderung der Elektromaschine, des BMS sowie aller Hochvolt-Komponenten ohne Anpassung des Gesamtsystems an die geänderten Komponenten. Eine Gefährdung der Verkehrsteilnehmer ist auch bei Änderung der Ladeeinrichtung zu erwarten.

Die empfohlenen Änderungen sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

			Betriebserlaubnis des Fahrzeugs				
			erlischt nicht		erlischt		
			weil keine Genehmigung und/oder Teilegutachten erforderlich	wenn Teilegenehmigung vorhanden und nicht von der Änderungsabnahme abhängig gemacht	wenn Teilegenehmigung vorhanden und von der Änderungsabnahme abhängig gemacht oder Teilegutachten vorhanden	wenn keine Teilegenehmigung oder Teilegutachten vorhanden oder der Verwendungsbereich nicht eingehalten	
Gruppe		Änderung	ohne Einschränkung verwendbar, muss jedoch der StVZO entsprechen	Änderungsabnahme nicht erforderlich, Beschränkungen oder Einbauanweisungen müssen aber eingehalten sein	unverzögliche Änderungsabnahme erforderlich	Begutachtung nach § 19 (2) Satz 3/§ 21 StVZO hins. d. Änderung erforderlich	Bemerkungen Hinweise auf besonders zu beachtende Vorschriften/ Sonderfälle
1		2	3	4	5	6	7
X. Hochvoltkomponenten (neue Gruppe eingefügt)	X.1	Austausch des Energiespeichers	x				wenn der Energiespeicher gleichwertige Kennwerte und Spezifikationen aufweist
	X.2	Einbau eines anderen Energiespeichers			x	xy)	y) Begutachtung nach § 21 StVZO erforderlich
	X.3	Einbau einer anderen Elektromaschine			x	xy)	
	X.4	Einbau eines anderen bzw. Veränderungen am Spannungswandler			x	xy)	
	X.5	Hochvoltkabel und Hochvoltsteckverbinder		x			ECE R100 muss erfüllt sein
	X.6	Bordseitig installierte Ladeeinrichtung			x	xy)	
	X.7	Hochvoltklimakompressor		x	x	xy)	
	X.8	Hochvoltheizung		x	x	xy)	

Tab. 13: Erweiterung von Teil B des Beispielkataloges um die Gruppe der Hochvoltkomponenten

6.2.2 Änderungen im § 29 StVZO und den Anlagen VIII bis VIId

Änderungen im § 29 StVZO

(Untersuchung der Kraftfahrzeuge und Anhänger)

Um die in der ECE-R 100 vorgeschriebene Anfahrsperrung bei fahrzeugseitig verbundener Ladeeinrichtung überprüfen zu können, ist es notwendig, dass

der Halter zur Hauptuntersuchung die Ladeeinrichtung seines Fahrzeuges mitführt. Weitere Erörterungen zur Notwendigkeit der Überprüfung der Ladeeinrichtung werden momentan im parallel laufenden BAST-SiFo-Projekt „Sicherheitsaspekte beim Laden von Elektrofahrzeugen“ erarbeitet. Es wird vorgeschlagen, in § 29 einen neuen Absatz zu integrieren, der das Mitführen der Ladeeinrichtung zur HU vorschreibt.

In Anlage VIII sind keine Änderungen erforderlich.

Änderungen in der Anlage VIIIa

(Durchführung der Hauptuntersuchung)

Der elektrische sowie Hybridantrieb sind laut Untersuchungspunkt 6.8.7 und 6.8.8 auf die Einhaltung der Vorgaben hin zu untersuchen. Zusätzlich wird empfohlen, den Untersuchungspunkt Hochvolt-system in Anlage VIIIa mit aufzunehmen und um die in Tabelle 14 aufgeführten Pflichtuntersuchungspunkte zu ergänzen.

Die Durchführung der einzelnen Untersuchungen sollte in einer separaten Richtlinie (HU-Hochvolt-Richtlinie) beschrieben werden.

In Anlage VIIIc sind keine Änderungen erforderlich.

Untersuchungs- punkt (Bauteil, System)	Untersuchungskriterium	
	Pflichtunter- suchung	Ergänzungsunter- suchungen (Beispiele)
6.8.7 Elektrischer Antrieb von Kraftfahrzeugen		
Hochvoltsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung von Vorgaben • Ausführung <ul style="list-style-type: none"> – Zulässigkeit • Zustand <ul style="list-style-type: none"> – Auffälligkeiten 	
6.8.8 Hybridantrieb von Kraftfahrzeugen		
Hochvoltsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung von Vorgaben • Ausführung <ul style="list-style-type: none"> – Zulässigkeit • Zustand <ul style="list-style-type: none"> – Auffälligkeiten 	

Tab. 14: Vorgeschlagener Untersuchungspunkt „Hochvoltsystem“ in Anlage VIIIa

Änderungen in der Anlage VIIIId

(Untersuchungsstellen zur Durchführung von Hauptuntersuchungen, Sicherheitsprüfungen, Untersuchungen der Abgase und wiederkehrende Gasanlagenprüfungen)

Bei den Hybrid- sowie Elektrofahrzeugen der Klassen M2, M3 sowie N2 und N3 befinden sich häufig wichtige Hochvoltkomponenten, wie z. B. der Energiespeicher oder die Wechselrichter, auf dem Dach. Diese müssen bei der periodisch technischen Überprüfung einer Sichtkontrolle unterzogen werden. Da die Dächer bei diesen Fahrzeugklassen eine Höhe von über 2,50 m erreichen, ist an den Untersuchungsstellen, bei denen ein solches Fahrzeug geprüft werden soll, eine Vorrichtung notwendig, die sicheres Arbeiten in Höhen von bis 5 m ermöglicht.

Hierzu ist in die Tabelle in der Anlage VIIIId zu Nummer 3 folgende Ergänzung notwendig (s. Tabelle 15).

6.2.3 Änderungen der HU- und SP-Richtlinien

Änderungen der HU-Richtlinie Mängel inkl. einheitlichem Mangelbaum

Mit der 47. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften (47. ÄndVStVR) verankerte der Verordnungsgeber in der Anlage VIIIa unter den Punkten 6.8.7 Elektrischer Antrieb von Kraftfahrzeugen und 6.8.8 Hybridantrieb von Kraftfahrzeugen den Pflichtuntersuchungspunkt „Einhaltung von Vorgaben“.

In der Anlage zu Nr. 4 der HU-Richtlinie wird dieser Pflichtuntersuchungspunkt unter 6. Fahrgestell, Rahmen, Aufbau, daran befestigte Teile unter 629 Antriebssystem für Kraftfahrzeuge mit elektrischem Antrieb bzw. Kraftfahrzeuge mit Hybridantrieb mit der Einstufung erheblicher Mängel bzw. verkehrs-

Untersuchungsstellen/ Anforderungen	1	2	3	4	5	6	7
	Prüfstellen	Prüfstütz- punkte	Prüfplätze	Anerkannte Kraftfahr- zeugwerkstätten zur Durchführung von			
				SP	AU	AUK	GWP
X. Vorrichtung, um sicheres Arbeiten in Höhen bis 5 m zu ermöglichen (Dacharbeitsstand, Leiter mit Sicherungsmöglichkeit)	X ^{Y)}	X ^{Y)}	X ^{Y)}	-	-	-	-
Abweichungen nach 4.2: Y) Ausstattung nur erforderlich, wenn Fahrzeuge mit Hochvoltkomponenten in über 2,5 m Höhe untersucht werden							

Tab. 15: Ergänzung zu Anlage VIIIId zu Nummer 3

unsicher für die Nicht-Einhaltung der Vorgaben abgebildet.

Die Mangelfallgestaltungen sind im einheitlichen Mangelbaum unter der Baugruppe „Alternatives Antriebssystem“ zur Dokumentation von Mängeln, die bei der HU an diesen Systemen festgestellt werden können, beginnend mit der Version 1.0.0 zum 01.07.2012 bereitgestellt.

Derzeit stehen dem Sachverständigen ca. 100 Mangelfallgestaltungen zur Dokumentation von Mängeln am elektrischen Antriebssystem bei Fahrzeugen mit Hybrid- bzw. Elektroantrieb zur Verfügung. Zu jedem der hinterlegten Bauteile steht dem Sachverständigen ein Freitextfeld zur Dokumentation von im Mangelbaum noch nicht enthaltenen Mangelfallgestaltungen zur Verfügung.

Nach Analyse der tatsächlichen Mangelhäufigkeiten, der Auswertung der Freitextmängel sowie des Fragebogens kann der Mangelbaum durch Ergänzung bzw. Überarbeitung von bestehenden Mangelfallgestaltungen halbjährlich an die Bedürfnisse der Praxis angepasst werden.

Keine Änderungen erforderlich.

Änderungen in der Vorgaben-Richtlinie

(Richtlinie für die Lieferung von Vorgaben durch Fahrzeughersteller oder -Importeure für die regelmäßige technische Überwachung der Fahrzeuge nach § 29 StVZO)

Die relevanten Regelungen gelten allgemein „für sicherheits- oder umweltrelevante elektronisch geregelte Fahrzeugsysteme“. Diese werden durch die Anlage VIIIa bzw. durch die Anlage 1 (zu Nr. 1 der Vorgaben-Richtlinie) definiert, und dort sind jeweils der Elektro- und Hybridantrieb bereits heute berücksichtigt.

Keine Änderungen erforderlich.

Anlage 1 (zu Nr. 1 der Vorgaben-Richtlinie)

(Zusammenstellung der für die regelmäßige technische Überwachung nach § 29 StVZO relevanten elektronisch geregelten Fahrzeugsysteme und -Funktionen – „Systemliste“)

In den Kriterien für die Sicherheits- und/oder Umweltrelevanz von elektronisch geregelten Fahrzeugsystemen ist der Punkt „Elektrisches Antriebskonzept zum Fahrzeugantrieb“ enthalten.

Folgerichtig enthält die „Liste der Beispiele für System- und Funktionsbeschreibungen zu den Untersuchungspunkten gemäß Anlage VIIIa StVZO“ bereits heute die „Systeme“ S014 und S025 (s. Bild 24 und Bild 25).

Da die einschlägigen Systeme S014 und S025 so interpretiert werden, dass es sich um das ganze System inklusive aller dazugehörigen Baugruppen und Bauteile handelt, sind für Hochvolt-Fahrzeuge keine Änderungen notwendig.

Anlage 2 (zu Nr. 6 der Vorgaben-Richtlinie)

(Ablaufverfahren für die Erstellung von Vorgaben)

Das hier beschriebene Ablaufverfahren beschreibt allgemein den Arbeitsablauf zur Erstellung von Vorgaben.

Keine Änderungen erforderlich.

Anlage 3 (zu Nr. 4.3 der Vorgaben-Richtlinie)

(Weitergabe und Anwendung der Vorgaben an die nach Anlage VIIIc StVZO anerkannten Kraftfahrzeugwerkstätten)

Hier wird beschrieben, unter welchen Randbedingungen Vorgaben an SP-Werkstätten weitergegeben werden sollen.

Keine Änderungen erforderlich.

S014	Elektrischer Fahrzeugantrieb	Beinhaltet alle Antriebe, die in der Lage sind, das Fahrzeug allein elektrisch zu bewegen (z. B. laut: ECE-R 100).	E-Antrieb, Fuel-Cell
------	------------------------------	--	----------------------

Bild 24: Auszug Punkt S014 aus Anlage VIIIa S. 24 (StVZO 2012)

S025	Hybridantrieb	Beinhaltet alle Antriebstechniken mit mindestens zwei unterschiedlichen Energieumwandlern.	Mildhybrid, Fullhybrid
------	---------------	--	------------------------

Bild 25: Auszug Punkt S025 aus Anlage VIIIa S. 25 (StVZO 2012)

Änderungen in der HU-Bremsenrichtlinie

(Richtlinie für die Prüfung der Bremsanlagen von Fahrzeugen bei Hauptuntersuchungen (HU) nach § 29 StVZO)

Die Richtlinie bezieht im Punkt 5.1.2.5 (s. Bild 26) alle nicht explizit erwähnten Bremssysteme/Bremsanlagen in die Gültigkeit der Richtlinie mit ein.

Keine Änderungen erforderlich.

Änderungen in der HU-Datenübermittlungsrichtlinie

(Richtlinie für die einheitliche Meldung der bei Hauptuntersuchungen (HU) festgestellten Mängel und festgestellten Ausbauten oder Hoch- beziehungsweise Rückrüstungen von sicherheits- und/oder umweltrelevanten Einrichtungen an Fahrzeugen von den Technischen Prüfstellen (TP) und amtlich anerkannten Überwachungsorganisationen (ÜO) an die Zentrale Stelle nach Nummer 3.2, Anlage VIIIa und Nummer 8.3 der Anlage VIII StVZO)

Die Richtlinie beschreibt, wie die Ergebnisse der Hauptuntersuchung an die zentrale Stelle übermittelt werden sollen. Die Mangel-Feststellungen sind dabei als Bezug zum Mangelbaum repräsentiert (s. Bild 27).

Sofern die neuen „Hochvolt-Mängel“ im Mangelbaum definiert sind, werden sie auch ohne Änderung der Richtlinie mit übermittelt.

Keine Änderungen erforderlich.

Änderungen in der SP-Richtlinie

(Richtlinie für die Durchführung von Sicherheitsprüfungen (SP) nach § 29 und Anlage VIII StVZO)

Aus den Ergebnissen des Feldversuchs geht nicht hervor, dass die Hochvoltkomponenten einem besonders starken Verschleiß unterliegen. Da die untersuchten Fahrzeuge sehr jung waren, traten Beschädigungen an Hochvoltkomponenten noch nicht in besonders großem Umfang auf. Dies kann sich mit zunehmendem Altern der Fahrzeuge aber ändern.

Aus jetziger Sicht sind keine Änderungen notwendig.

Die Mangelentwicklung bei der HU muss beobachtet werden. Zu einem späteren Zeitpunkt kann sich

5.1.2.5	Sonstige Bremsanlagen Sonstige Bremsanlagen anderer Bauart sind in Anlehnung an die Vorgaben für die oben genannten Bremsanlagen zu untersuchen.
---------	---

Bild 26: Auszug Punkt 5.1.2.5 aus der HU-Bremsenrichtlinie S. 145 (StVZO 2012)

HU.11a	Vollständige Mängelbeschreibung mit Code (AKE-Code nach „Mangelbaum“) zu jedem festgestellten Mangel
HU.11b	Einstufung uu jedem festgestellten Mangel

Bild 27: Auszug aus Punkt 4 der Anlage VIIIa S. 35 (StVZO 2012)

eventuell die Notwendigkeit ergeben, die elektrische Ausrüstung mit in die Liste der Prüfpunkte aufzunehmen.

Änderungen in den Rahmenlehrplänen für aaSoP/PI

In den aktuellen Rahmenlehrplänen für aaSoP (Verkehrsblatt-Dokument Nr. B3712 – Vers. 02/13) und PI (Verkehrsblatt-Dokument Nr. B3657 – Vers. 11/13 Inkrafttretungsdatum 01.02.2013) wurden in Bezug auf alternative Antriebe die Lehrinhalte erweitert.

Durch die fachliche Ausbildung, die durch die Rahmenlehrpläne vorgegeben ist, kann der aaSoP/PI mögliche Gefahren von HV-Systemen erkennen und beurteilen. Eine Schulung zur Elektrofachkraft wird nicht gefordert, da keine Arbeiten am Hochvoltsystem bei der wiederkehrenden Untersuchung des Kraftfahrzeuges erfolgen.

Für aaSoP/PI, die nach älteren Rahmenlehrplänen ausgebildet wurden, wird eine Fortbildung zu HV-Systemen in Fahrzeugen im Rahmen der Pflichtfortbildungsmaßnahmen (PI → Anlage VIIIb Abs. 2.5 StVZO/aaSoP → § 11 (2) KfSachvG) gefordert.

Keine Änderungen erforderlich.

6.3 Änderungsvorschläge über die PTI hinaus

Aus den ermittelten Vorgaben besteht Änderungsbedarf für die Typgenehmigung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang. Bis zur Umsetzung der vorgeschlagenen Änderungen im Typgenehmigungsverfahren ist anzuregen, dass die Prüfmöglichkeiten auf freiwilliger Basis von den Fahrzeugherstellern umgesetzt werden.

So muss die Klimaanlage, wenn diese die Hochvolt-Batterie kühlt bzw. an deren Klimatisierung beteiligt ist, bei allen Temperaturen – besonders bei kalten Umgebungstemperaturen – prüfbar sein. Die notwendigen Werte müssen diagnosefähig sein und der Zentralen Stelle inklusive zugehöriger Grenz- und/oder Referenzwerte offengelegt werden.

Zusätzlich sollte auch ein Prüfmodus für den Isolationswächter erstellt werden. Dieser sollte ein Aufschalten definierter Isolationswiderstände über Taster oder die Diagnose beinhalten, auf die das System reagieren muss.

Ebenfalls sollen die Kapazitäten der Zwischenkreis-kondensatoren vom Fahrzeug berechnet, diese Werte über die Diagnoseschnittstelle bereitgestellt, bzw. ein alternatives Verfahren angeboten werden.

Um eine ausreichende Prüfschärfe sicherzustellen, muss eine einheitliche Diagnoseschnittstelle für die Hochvoltkomponenten vorgeschrieben werden. Sinnvoll ist es, sich hierbei an dem OBD-Standard zu orientieren, zumal die hardwareseitigen Voraussetzungen schon heute bei Hybridfahrzeugen umgesetzt werden müssen. Neben den elektrischen Komponenten müssen auch die in Kapitel 4.2 dargestellten Rückwirkungen auf die mechanischen Komponenten berücksichtigt werden. Vor allem ist hier die verstärkte Degradation der Bremsanlage zu beachten. Um die beschriebenen Auswirkungen zu minimieren, sollte geprüft werden, ob ein intervallweises Aktivieren der Reibbremsanlage zweckmäßig ist.

Zusätzlich soll der Ladegerätetyp (externes Ladegerät) in die Certificate-of-Conformity- (COC-)Papiere aufgenommen werden. Darüber hinaus ist die Kennzeichnung der zulässigen Ladegeräte am Fahrzeug oder der zulässigen Fahrzeuge auf dem Ladegerät wünschenswert. Dies ist notwendig, da die Ladegeräte auf die Systemkomponenten (vor allem auf die Batterie) abgestimmt sein müssen. Bei Verwendung von nicht geeigneten Ladegeräten kommt es zu Batterieschäden, im schlimmsten Fall zum Brand. Hierdurch liegen die Aufnahme des Ladegerättyps in die COC-Papiere sowie die Zugehörigkeitskennzeichnung im Interesse des Verbrauchers bzw. Halters.

Aufgrund der ermittelten Unzulänglichkeiten von Fahrzeugen der Klasse L, insbesondere L1e und Pedelecs, sollten die Vorschriften für diese Fahrzeugklassen an den technischen Stand angepasst werden. Hierbei ist vor allem die Erweiterung der

ECE-R 100 auf die Fahrzeuge der Klasse L zu nennen. Weiterhin sind eine Verschärfung der Materialanforderungen sowie Ladesteckeranforderungen für den fahrzeugseitigen Ladeanschluss erforderlich. Eine Definition der fahrzeugseitigen Stecker-typen für den Ladeanschluss ist notwendig, da viele Fahrzeuge der Klasse L1e über ein externes Netzgerät geladen werden und als fahrzeugseitigen Ladeanschluss einen Kaltgerätestecker nutzen. Hierdurch kann das Fahrzeug problemlos direkt an das Hausstromnetz angeschlossen werden. An der Batterie liegen dann 230 V Wechselspannung an, anstatt der für die Ladung notwendigen Gleichspannung (meist 36 V bis 85 V). Dies führt zur starken Schädigung der Batterie bis hin zum Brand.

Entsprechende Änderungsvorschläge für die internationalen Typpengenehmigungsvorschriften sind zu erarbeiten, national abzustimmen und anschließend in die Vorschriftengremien bei der UN ECE einzugeben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projektes war es, die durch die steigende Anzahl im Verkehr befindlicher elektrisch und hybrid-elektrisch betriebener Fahrzeuge entstandene Anforderung an eine Anpassung der periodisch technischen Untersuchung zu analysieren. Hierzu wurden alle für eine Untersuchung in Frage kommenden Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs identifiziert und aufgelistet. Im Anschluss wurden die theoretischen Auswirkungen von Alterung, Verschleiß, Manipulation und Beschädigung auf die Funktionalität der Bauteile untersucht. Für die Auswirkungen auf das Gesamtsystem wurde ein Simulationsmodell des elektrischen Antriebsstrangs erstellt, das die Zusammenhänge aller Einzelkomponenten des Systems abbilden kann. Für die Validierung der im Simulationsmodell getroffenen Annahmen und der resultierenden Ergebnisse wurden verschiedene Tests an Versuchsträgern vom Typ Hybrid- und Elektrofahrzeug durchgeführt. Hinzu kamen Untersuchungen zur Rückwirkung der Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs auf konventionelle Komponenten des Fahrzeuges. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem Feldversuch können folgende Aussagen getroffen werden:

Aufgrund der geringen Anzahl an Fahrzeugen der Klasse L und reiner Elektrofahrzeuge können die

Ergebnisse besonders des Ladekabels und des Ladenschlusses als nicht repräsentativ gewertet werden. Dennoch ist bei Fahrzeugen der Klasse L die hohe Anzahl an Lagerschäden genauso wie die Bemängelung der Ladeeinrichtung sehr auffällig. Auffällig ist die starke Degradation der Isolationsfähigkeit der Hochvoltverbindungen. Hierzu führen fehlende oder beschädigte Kabelführungen sowie Beschädigungen an den Steckverbindungen. Bei 2,4 % der untersuchten Fahrzeuge wurden Scheuerstellen, Marderbisse, brüchige Isolation oder ein Übersprühen der Hochvoltkabel mit Unterbodenschutz festgestellt.

Die Ergebnisse aus den Feldversuchen, den theoretischen Betrachtungen und der Modellsimulation des elektrischen Antriebsstrangs dienen als Grundlage für eine differenzierte Einschätzung des Gefahrenpotenzials, das von den einzelnen Funktionen und Bauteilen ausgeht. Mit einbezogen in die Bewertung wurde darüber hinaus der Einfluss von Manipulationen an sicherheits- bzw. umweltkritischen Komponenten.

Die so entstandene Untergliederung der bewerteten Bauteile diene als Vorlage für die Entwicklung neuer Prüfmethode und Vorgaben. Bestehende Vorgaben laufen überwiegend auf Sicht- und Wirkungsprüfungen für elektrisch betriebene Fahrzeuge hinaus. Jedoch ergeben sich eine erhöhte Effektivität und Prüftiefe mit dem zukünftigen Einsatz eines Diagnosegerätes, sofern Systemdaten und Referenzwerte sowie eine entsprechende Schnittstelle im Fahrzeug zur Verfügung stehen.

In der 47. Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften (47. ÄndVStVR) vom 10. Mai 2012 wurden bereits an vielen Stellen neue Antriebskonzepte berücksichtigt. Dennoch besteht weiterer Anpassungsbedarf in verschiedenen Richtlinien, Paragraphen und Anlagen. Hierzu gehören die Richtlinie 2002/24/EG bzw. 97/24/EG bezüglich der Betriebserlaubnis nach § 19, § 29 StVZO betreffs der Mitführung der Ladeeinrichtung (wenn vorhanden), Anlage VIIIa betreffs der Untersuchungspunkte während der HU, Anlage VIII d bezüglich Dacharbeitsständen für die Untersuchung der Fahrzeugklassen M2, M3 sowie N2 und N3 und der Teil B des Beispielkataloges von § 19 StVZO.

Einige Prüfverfahren sind während der periodisch technischen Überprüfung momentan technisch nicht durchführbar. Es wird daher an die Fahrzeughersteller bis zum Inkrafttreten neuer Typgenehmi-

gungsverfahren appelliert, die Prüfbarkeit im Hinblick auf eigene Prüfvorgaben als auch hinsichtlich der Zugänglichkeit wichtiger Funktionen und Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs zu verbessern. Für die Einführung der neu entwickelten Untersuchungspunkte zum HV-System wird die Entwicklung einer neuen Hochvolt-Richtlinie empfohlen.

Untersuchungen und Recherchen zu Manipulationen an HV-Fahrzeugen haben ergeben, dass bereits vermehrt Foren existieren, die technische Beschreibungen für Eingriffe in die entsprechenden Fahrzeugsysteme zur Verfügung stellen. Die Durchführung eigener Manipulationsversuche und Beobachtung der betreffenden Foren stellen einen wichtigen Teil für die künftige Vorgabenentwicklung dar.

Darüber hinaus sind die Typgenehmigungsvorschriften für diese Fahrzeuge fortzuschreiben, um eine effiziente PTI zu ermöglichen.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollten zudem der EU-Kommission, gegebenenfalls mit konkreten Änderungsvorschlägen für die Richtlinie 2009/40/EG i. d. F. der Richtlinie 2010/48/EU, bekannt gegeben werden.

8 Literatur

- AISIN, S.: Fahrzeugbremssystem mit einem Hub-simulator und einer Servovorrichtung. Patent, <http://www.patent-de.com/20051020/DE19958304B4.html>, 12. Juni 2013
- Autoliv Inc.: Pyrotechnical Safety Switch – PSS2. <http://www.pyroswitch.com/pss2.html?&L=0>, 12. Juni 2013
- Behr Hella Service GmbH: Fahrzeugkühlung – Kompaktes Wissen für die Werkstatt. http://www.behrhellaservice.com/behrhellaservice-de-de/assets/media/TM2008_P06_TechnicalBooklet.pdf, 12. Juni 2013
- Bender GmbH & Co. KG: Technische Aspekte – Hauptkatalog Teil 1, Isolationsüberwachungsgeräte A-ISOMETER®, Isolationsfehlersucheinrichtungen, Bender-Kommunikationslösungen.
- BIROLINI, A.: Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997

- BLUME, B.: Ohmsche Widerstände anwendungs-
basiert auswählen. Artikel, Elektronik Praxis, 18.
Dezember 2007
- BÖHM, L.: Entwicklung eines Gerätes zur Simula-
tion und Manipulation von Fahrzeugdrehzahl-
sensoren sowie Test der Fahrzeugreaktion auf
diese Signale. Dresden, Hochschule für Technik
und Wirtschaft, Diplomarbeit, 2010
- Colliseum: Ausrollverzögerungen von Pkw bei un-
gebremstem Auslauf. [http://www.colliseum.net/
wiki/Ausrollverz%C3%B6gerungen_von_Pkw_
bei_ungebremstem_Auslauf](http://www.colliseum.net/wiki/Ausrollverz%C3%B6gerungen_von_Pkw_bei_ungebremstem_Auslauf), 12. Juni 2013
- Continental Automotive GmbH 2013: Druckensoren
und Schalter. [http://www.vdo.de/generator/www/
de/de/vdo/main/products_solutions/special_oem_
solutions/platform_products/sensors/engine_
chassis_sensors/pressure_sensor/pressure_se
nsors_de.html?activetab=38_69682](http://www.vdo.de/generator/www/de/de/vdo/main/products_solutions/special_oem_solutions/platform_products/sensors/engine_chassis_sensors/pressure_sensor/pressure_sensors_de.html?activetab=38_69682), 12. Juni
2013
- DIN 25419: Ereignisablaufanalyse – Verfahren,
graphische Symbole und Auswertung. Beuth
Verlag GmbH, Berlin, November 1985
- DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktions-
fähigkeit von Sysmten – Verfahren für die Fehl-
zustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA).
Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2006
- DIN EN 61025: Fehlzustandsbaumanalyse. Beuth
Verlag GmbH, Berlin, August 2007
- EIHP – European Integrated Hydrogen Project –
Phase II. <http://www.eihip.org/>12. Juni 2013
- HEISSING: Fahrwerkhandbuch, Grundlagen, Fahr-
dynamik, Komponenten, Systeme, Mecha-
tronik, Perspektiven. Wiesbaden: Vieweg +
Teubner Verlag, Springer-Fachmedien Wiesba-
den GmbH, 2011
- Helag-electronic GmbH, [http://www.helag-electroni
c.de/index.php?id=8,0,0,1,0,0](http://www.helag-electronic.de/index.php?id=8,0,0,1,0,0), 10. September
2012
- Hella KGaA Hueck & Co. [http://www.hella.com/prod
uktion/amc/WebSite/AMC_Resources/Databas
eTI/Deutsch/ti_d_electronics_fahrpedalsensor1.
pdf](http://www.hella.com/produktion/amc/WebSite/AMC_Resources/Databas_eTI/Deutsch/ti_d_electronics_fahrpedalsensor1.pdf), 10. September 2012
- HOFHEINZ, W.: Elektrische Sicherheit bei der
Ladung von Elektrofahrzeugen. München: Carl
Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011
- HÜBNER, M.: Zuarbeit für Bericht BAST-Projekt: Er-
mittlung des Änderungsbedarfs aufgrund von
Elektrofahrzeugen bei der periodisch techni-
schen Überwachung. HTW Dresden, 12. April
2013
- HUPPERTZ, H.: Drucksensor, Artikel, kfz-tech.de,
Februar 2011
- HUPPERTZ, H.: Kühlmittelpumpe. Artikel, [kfz-
tech.de](http://kfz-tech.de), Februar 2012
- ISO 26262-9: Road vehicles – Functional safety –
Part 9: Automotive Safety Integrity Level (ASIL)-
oriented and safety-oriented analyses. ISO
copyright office, Geneva (Schweiz), 15. Novem-
ber 2011
- MELEXIS Microelectronic Systems: Chassis
Systems: Brake Pedal Position Sensor. [http://
www.melexis.com/Application/Chassis-Syste
ms-8.aspx](http://www.melexis.com/Application/Chassis-Systems-8.aspx), 12. Juni 2013
- MIETKE, D.: Vom Elektron zur Elektronik – Transis-
torverstärker in Basisschaltung. [http://elektronik
tutor.de/analogverstaerker/verst_b.html](http://elektroniktutor.de/analogverstaerker/verst_b.html), 12. Juni
2013
- NAU, M.: Elektrische Temperaturmessung mit Ther-
moelementen und Widerstandsthermometern.
JUMO GmbH und Co. KG, Fulda, 2004
- ROOD Microtec: Vorbeugende Analysemethode.
[https://www.roodmicrotec.com/...Vorbeugen
de_Analysemethode.pdf](https://www.roodmicrotec.com/...Vorbeugende_Analysemethode.pdf), 4. September 2012
- SCHÄFER, H.: Praxis der elektrischen Antriebe für
Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Renningen:
expert verlag, 2009
- SCHINDLER, G.: Auszug aus „Magnetische Bautei-
le und Baugruppen“. [http://www.attempo.com/
Daten/MagnBauteile.pdf](http://www.attempo.com/Daten/MagnBauteile.pdf), 12. Juni 2013
- SCHROEDER, D.: Elektrische Antriebe – Regelung
von Antriebssystemen. Berlin, Heidelberg:
Springer Lehrbuch, 2008
- SEW Eurodrive GmbH und Co: SEW Geber-
systeme – Handbuch. [http://www.sew-eurodrive
.de/download/pdf/09196404.pdf](http://www.sew-eurodrive.de/download/pdf/09196404.pdf), 12. Juni 2013
- STEININGER, A.: Defekte & Fehler. Wien: Techni-
sche Universität Wien, 2008
- StVZO – Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung –
Loseblatt-Ausgabe in 3 Ordnern, Grundwerk mit

-
49. Ergänzungslieferung. Hrsg: H. BRAUN, H. KONITZER, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1. Juni 2012
- TELLE, R.: Keramik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- THOBEN, M.: Zuverlässigkeit von großflächigen Verbindungen in der Leistungselektronik. Bremen, Universität, Dissertation, 2002
- WALLENTOWITZ: Handbuch Kraftfahrzeugelektronik, Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2006
- WEN, S.: Increasing Large Li-Ion Battery Pack Energy Delivery with Active Cell Balancing. EE Times Europe, 14. Oktober 2009
- WIESINGER, J.: Bremsassistent (BAS). <http://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/bremsen/bremsassistent.htm>, 12. Juni 2013
- Elektrolytkondensator. <http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolytkondensator>, 12. Juni 2013
- Keramikkondensator. <http://de.wikipedia.org/wiki/Keramikkondensator>, 12. Juni 2013
- Stromsensor. <http://de.wikipedia.org/wiki/Stromsensor>, 12. Juni 2013

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2000

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter PKW-Reifen
Glaeser
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen
Aubel € 13,00
- F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit
Breitreifen
Faber € 12,50
- F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen – Fahr-
zeugsicherheit '95 – Analyse aus Erhebungen am Unfallort
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BAST – Ein-
weihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am
4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00

2001

- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00
- F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem
Emissions-Mess-Fahrzeug
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00
- F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling,
Richter, Gaupp € 19,00
- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00

- F 37: Abgasuntersuchung – Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50

- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgänger-
schutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung
von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50

- F 40: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Spritzschutzsysteme
an Kraftfahrzeugen
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00

- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstieg-
systems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00

- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kin-
derschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50

- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im
Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50

- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur
Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00

- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformations-sys-
temen
Jahn, Oehme, Rösler, Krens € 13,50

- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und
bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50

- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rucker, Bürkle, Mattern, Kallieris € 18,00

- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50

- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50

- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00

- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00

- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen
durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2005

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on
3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

- F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die
Verwendung asphärischer Außenspiegel
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00

- F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

- F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren
Steven, Kleinebrahm € 15,50

- F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50

- F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme
aus Sicht der Verkehrssicherheit
Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

2007

- F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on
1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

- F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belan-
ge der passiven Sicherheit
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

- F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

2008

F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw
Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009

F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild
Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern
Seiniger, Winner € 16,50

2010

F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011

F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands
Eichinger € 15,00

F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern
Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011
Lotz, Luks € 17,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes
Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

F 91: Standardisierungsprozess für offene Systeme der Straßenverkehrstelematik
Kroen € 17,00

F 92: Elektrofahrzeuge – Auswirkungen auf die periodisch technische Überwachung
Beyer, Blumenschein, Bönninger, Grohmann, Lehmann, Meißner, Paulan, Richter, Stiller, Calker € 17,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.