

Dirk Morche, Fabian Schmitt, Klaus Genuit, Olaf Elsen,
Achim Kampker, Christoph Deutszens, Heiner Hans Heimes,
Mateusz Swist, Andreas Maue, Ansgar vom Hemdt,
Christoph Lienemann, Andreas Haunreiter, Saskia Wessel,
Ansgar Hollah, Bernd Friedrich, Matthias Vest,
Tim Georgi-Maschler und Wang Honggang

5.1 Fahrzeugklassen

5.1.1 Zulassungspflicht und Typgenehmigung

Jedes Kraftfahrzeug mit einer Bauart bedingten Geschwindigkeit von mehr als 6 km/h, das im öffentlichen Straßenverkehr betrieben wird, unterliegt einer gesetzlichen Zulassungspflicht. Die Notwendigkeit einer solchen Zulassung ist in § 3 der Fahrzeugzulassungsverordnung 2011 (FZV) festgeschrieben.

In § 3 Absatz 1 FZV heißt es: Fahrzeuge dürfen auf öffentlichen Straßen nur in Betrieb gesetzt werden, wenn sie zum Verkehr zugelassen sind. Die Zulassung wird auf Antrag erteilt, wenn das Fahrzeug einem genehmigten Typ entspricht oder eine Einzelgenehmigung erteilt ist. Das bedeutet: Jedes Fahrzeug muss ein Typprüfungsverfahren oder eine Homologation durchlaufen. Der Umfang der Typprüfung richtet sich nach der sog. Fahrzeugklasse

D. Morche · F. Schmitt · O. Elsen

StreetScooter GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: dirk.morche@streetscooter.eu; fabian.schmitt@streetscooter.eu; olaf.elsen@streetscooter.eu

K. Genuit

HEAD acoustics GmbH, Herzogenrath, Deutschland

E-Mail: klaus.genuit@head-acoustics.de

A. Kampker (✉) · C. Deutszens · H.H. Heimes · A. Maue · A. vom Hemdt · C. Lienemann ·
A. Haunreiter · S. Wessel · A. Hollah

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen
University, Aachen, Deutschland

E-Mail: a.kampker@pem.rwth-aachen.de; c.Deutszens@pem.rwth-aachen.de; h.heimes@pem.rwth-aachen.de; a.maue@pem.rwth-aachen.de; a.hemdt@pem.rwth-aachen.de; c.lienemann@pem.rwth-aachen.de; a.haunreiter@pem.rwth-aachen.de; s.wessel@pem.rwth-aachen.de; a.hollah@pem.rwth-aachen.de

und der späteren Produktionsstückzahl. Voraussetzung für die Zulassung ist entweder eine Typgenehmigung (EU oder national), eine Allgemeine Betriebserlaubnis (ABE) oder ein Gutachten eines amtlich anerkannten Sachverständigen für den Kraftfahrzeugverkehr zur Erlangung einer sog. Einzelbetriebserlaubnis (EBE).

Eine Typgenehmigung ist das Verfahren, nach dem ein Mitgliedstaat bescheinigt, dass ein Typ eines Fahrzeugs, eines Systems, eines Bauteils oder einer selbstständigen technischen Einheit den einschlägigen Verwaltungsvorschriften und technischen Anforderungen entspricht. (2007/46/EG 2007b)

Maßgeblich für die Typzulassung von Fahrzeugen innerhalb der EU und somit auch der Bundesrepublik Deutschland ist das europäische Rechtssystem. Die Einführung der EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung 2011 (EG-FGV) erfolgte zum 29. April 2009 und löst damit die nationale STVZO (Straßenverkehrszulassungsordnung 2009) zukünftig ab. Grundlage für die Einführung der EG-FGV ist die Richtlinie 2007/46/EG vom 5. September 2007 (2007/46/EG 2007a).

Ziel der damit befassten EU-Gremien war es, die Zulassung, den Verkauf und die Inbetriebnahme zu genehmigender Fahrzeuge innerhalb der EU zu erleichtern. Mit Einführung der EG-FGV gibt es keine Trennung mehr zwischen der Regelung in § 21 StVZO (Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge) und der neuen durchzuführenden Einzelgenehmigung nach § 13 EG-FGV. Aus diesem Grund wurde auch § 21 StVZO entsprechend angeglichen. Die Anforderungen des § 13 EG-FGV für die Erfassung der Daten, nach denen amtlich anerkannte Sachverständige ihr Gutachten erstellen, wurden in den § 21 StVZO übernommen.

5.1.1.1 Technische Prüfstellen und Technische Dienste

Neben den Sachverständigen der Technischen Prüfstellen können jetzt auch Sachverständige der beim Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) akkreditierten Technischen Dienste Gutachten nach § 13 EG-FGV erstellen. Diese Gutachten haben innerhalb der gesamten EU Gültigkeit.

Eine Begutachtung nach § 21 StVZO (Vollgutachten) bleibt jedoch weiterhin ausschließlich den Sachverständigen der Technischen Prüfstellen (TP) vorbehalten, die auch Gutachten nach § 13 EG-FGV erstellen dürfen. Dieser § 21 StVZO regelt die Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge, Vollgutachten sind Pflicht für Fahrzeuge, die länger als 7 Jahre außer Betrieb gesetzt wurden.

5.1.1.2 Zulassungsarten

Die unterschiedlichen Zulassungsarten sind geregelt in der Richtlinie 2007/46/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese

M. Swist

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

E-Mail: m.swist@wzl.rwth-aachen.de

B. Friedrich · M. Vest · T. Georgi-Maschler · W. Honggang

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

E-Mail: bfriedrich@ime-aachen.de; mvest@ime-aachen.de; tgeorgi@ime-aachen.de; whonggang@ime-aachen.de

Fahrzeuge. Die Vorschrift ersetzte mit Wirkung vom 29. April 2009 die Richtlinie 70/156/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger. (70/156/EWG 1970)

Die neue Richtlinie gilt für die Typgenehmigung von Fahrzeugen, die in einer oder mehreren Stufen zur Teilnahme am Straßenverkehr konstruiert und gebaut werden, sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten, die für derartige Fahrzeuge konstruiert und gebaut sind. Sie schafft einen harmonisierten Rahmen mit den Verwaltungsvorschriften und allgemeinen technischen Anforderungen für die Genehmigung aller in ihren Geltungsbereich fallenden Neufahrzeuge und der zur Verwendung in diesen Fahrzeugen bestimmten Systeme, Bauteile und selbstständigen technischen Einheiten. Außerdem gibt sie Vorschriften für den Verkauf und die Inbetriebnahme von Teilen und Ausrüstungen für Fahrzeuge, die nach der Richtlinie genehmigt wurden.

Spezielle Anforderungen für den Bau und den Betrieb von Fahrzeugen sind in derzeit 58 Einzelrichtlinien festgelegt. Diese betreffen bspw. Grenzwerte für Schadstoffemissionen und den Geräuschpegel. Anhang IV von 2007/46/EG enthält eine Auflistung dieser Rechtsakte.

5.1.1.3 Einzelbetriebserlaubnis

Für die Zulassung eines Neufahrzeugs ohne EG-Typgenehmigung oder EG-Kleinserien-Typgenehmigung ist eine Einzelgenehmigung nach § 13 EG-FGV erforderlich. Mit Inkrafttreten der Richtlinie 2007/46/EG kann diese Genehmigung nur noch erteilt werden, wenn das Neufahrzeug den Anhängen IV oder XI der Richtlinie entspricht oder alternativ die Anforderungen der StVZO erfüllt, die vergleichbare Vorgaben an Verkehrssicherheit und Umweltschutz enthalten. Trotz der Regelungen des § 13 Abs. 3 EG-FGV (Genehmigung von Anträgen auf Einzelgenehmigung (Einzelbetriebserlaubnis)) bleibt das bisherige Einzelbetriebserlaubnisverfahren nach § 21 StVZO weiterhin bestehen, wurde aber dem Typgenehmigungsverfahren, insbesondere beim Prüf- und Nachweisverfahren, angepasst (Abs. 2–5). Dazu wurde § 21 StVZO (Betriebserlaubnis für Einzelfahrzeuge) im Zusammenhang mit der Genehmigung von Einzelbetriebserlaubnissen geändert.

Weiteres Ziel der EU ist es, die Zahl der Einzelgenehmigungen bundesweit zu verringern. Der Fahrzeughersteller muss ab einer bestimmten Anzahl jährlich hergestellter Fahrzeuge diese im Wege der Kleinserien-Typgenehmigung in den Verkehr bringen. Die Anzahl der mit Einzelgenehmigung zugelassenen PKW (M1-Fahrzeuge) baugleichen Typs wird damit auf 20 % der für die Kleinserien-Typgenehmigung zulässigen Höchstzahl begrenzt.

Die Einführung einer Kleinserien-Typgenehmigung ist ebenfalls für weitere Fahrzeugklassen (bspw. N1, kleine Nutzfahrzeuge) geplant. Die Aufschlüsselung der davon betroffenen Fahrzeugtypen findet sich in § 2 FZV. Es handelt sich um Kraftfahrzeuge und Anhänger, für die Typgenehmigungen im Sinne folgender Verordnung erforderlich sind:

- Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007
- Richtlinie 2002/24/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. März 2002 für zwei- und dreirädrige Fahrzeuge und ihre Teile
- Richtlinie 2003/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 für land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge und ihre Teile

5.1.2 Fahrzeugklassen

5.1.2.1 Internationale Regelung der Fahrzeugklassen

Als Referenz für die Einteilung der Fahrzeugklassen gilt in nahezu allen Ländern weltweit die Richtlinie ISO 3833:1977 Road vehicles – Types – Terms and Definitions. (ISO 3833:1977) Diese Richtlinie ist der ISO-Standard für Straßenfahrzeuge, deren Typen, Begriffe und Definitionen. Die Richtlinie definiert Begriffe im Zusammenhang mit den Arten von Straßenfahrzeugen nach bestimmten Konstruktionsmerkmalen und technischen Eigenschaften. Sie gilt für alle Fahrzeuge, die für den Straßenverkehr bestimmt sind. Ausgenommen sind landwirtschaftliche Zugmaschinen, die nur gelegentlich für die Beförderung von Personen oder Gütern auf der Straße eingesetzt werden.

5.1.2.2 Europäische und nationale Regelung der Fahrzeugklasse

Das jährlich vom KBA herausgegebene „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern“ umfasst folgende Gliederung (KBA 2009):

- Teil A 1A EU Fahrzeugklassen
- Teil A 1B Fahrzeug- und Aufbauarten (national)
- Teil A2 Emissionsklassen
- Teil A3 Kraftstoffarten und Energiequellen

In Teil B dieses Verzeichnisses werden jeweils analog zur Gliederung die auslaufenden Bezeichnungen gelistet. Er basiert auf der Richtlinie 2007/46/EG (ergänzt durch die Verordnung der Kommission Nr. 678/2011 vom 14. Juli) (2007/46/EG 2011) und unterteilt Kraftfahrzeuge und deren Anhänger in vier große Hauptklassen mit jeweiligen Untergruppen, wovon die ersten drei Klassen in Tab. 5.1 aufgeführt sind.

5.1.2.3 Fahrzeugunterklassen

Fahrzeugunterklassen beschreiben Fahrzeuge, die vom Aufbau oder dem Bestimmungszweck her nicht eindeutig einer der vier Hauptklassen zugeordnet werden können.

Geländefahrzeug

Es handelt sich um ein Fahrzeug, das entweder der Klasse M oder N angehört und spezifische technische Merkmale aufweist, die seine Verwendung im Gelände ermöglichen.

Fahrzeug mit besonderer Zweckbestimmung

Dieses Fahrzeug zählt zur Klasse M, N oder O und weist spezifische technische Merkmale auf, mit denen eine Funktion erfüllt werden soll, für die spezielle Vorkehrungen bzw. eine besondere Ausrüstung erforderlich sind. Beispielsklassen hierfür sind: SA (Wohnmobile), SB (beschlussgeschützte Fahrzeuge) und SC (Krankentransportwagen).

Tab. 5.1 Übersicht der Fahrzeugklassen M, N und O

Klasse	Beschreibung
M	Vorwiegend für die Beförderung von Fahrgästen und deren Gepäck ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge.
M 1	Fahrzeuge der Klasse M mit höchstens acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes, Fahrzeuge der Klasse M1 dürfen keine Stehplätze aufweisen. Die Anzahl der Sitzplätze kann dabei auf einen einzigen (d. h. den Fahrersitz) beschränkt sein. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: max. 1000 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 75 Einheiten/Jahr
M 2	Fahrzeuge der Klasse M mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes und mit einer Gesamtmasse von höchstens 5 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
M 3	Fahrzeuge der Klasse M mit mehr als acht Sitzplätzen zuzüglich des Fahrersitzes und mit einer Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
N	Vorwiegend für die Beförderung von Gütern ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge.
N 1	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von höchstens 3,5 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 500 Einheiten/Jahr
N 2	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von mehr als 3,5 Tonnen und höchstens 12 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
N 3	Fahrzeuge der Klasse N mit einer Gesamtmasse von mehr als 12 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr
O	Anhänger, die sowohl für die Beförderung von Gütern und Fahrgästen als auch für die Unterbringung von Personen ausgelegt und gebaut sind.
O 1–2	Anhänger der Klasse O 1–2 mit einer Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 500 Einheiten/Jahr
O 3–4	Anhänger der Klasse O 3–4 mit einer Gesamtmasse von bis zu 3,5 Tonnen. <ul style="list-style-type: none"> • EG Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: 0 Einheiten/Jahr • Nationale Typgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 23: max. 250 Einheiten/Jahr

5.1.2.4 Fahrzeugklasse L

Eine Besonderheit stellt die Fahrzeugklasse L dar. Grundlage dafür ist die Richtlinie 2002/24/EG vom 18. März 2002 über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge und zur Aufhebung der Richtlinie 92/61/EWG. Durch diese Richtlinie wird die vollständige Anwendung des Typgenehmigungsverfahrens erstmals auch für diese Fahrzeugklasse möglich. Die Fahrklasse(n) L gelten gemäß dieser Richtlinie für zwei-, drei- und vierrädrige Kraftfahrzeuge. Aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen dieser Fahrzeugklasse können hier leicht Fahrzeuge mit Elektroantrieb realisiert werden (Tab. 5.2).

Tab. 5.2 Übersicht der Fahrzeugklasse L

Klasse	Beschreibung
L 1e	Zweirädrige Kleinkrafträder mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nenndauerleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L 2e	Dreirädrige Kleinkrafträder mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nutzleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren.
L 3e	Krafträder, d. h. zweirädrige Kraftfahrzeuge ohne Beiwagen mit einem Hubraum von mehr als 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.
L 4e	Krafträder mit Beiwagen
L 5e	Dreirädrige Kraftfahrzeuge, d. h. mit drei symmetrisch angeordneten Rädern ausgestattete Kraftfahrzeuge mit einem Hubraum von mehr als 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren und/oder einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h.
L 6e	Vierrädrige Leichtkraftfahrzeuge mit einer Leermasse von bis zu 350 kg, ohne Masse der Batterien im Falle von Elektrofahrzeugen, mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von bis zu 45 km/h und einem Hubraum von bis zu 50 cm ³ bei Verbrennungsmotoren oder einer maximalen Nutzleistung von bis zu 4 kW bei Elektromotoren. Diese Fahrzeuge müssen den technischen Anforderungen für dreirädrige Kleinkrafträder der Klasse L 2e genügen, sofern in den Einzelrichtlinien nichts anderes vorgesehen ist.
L 7e	Vierrädrige Kraftfahrzeuge, die nicht unter Klasse L 6e fallen, mit einer Leermasse von bis zu 400 kg (550 kg im Falle von Fahrzeugen zur Güterbeförderung), ohne Masse der Batterien im Falle von Elektrofahrzeugen, und mit einer maximalen Nutzleistung von bis zu 15 kW.

5.1.3 Fahrzeugklassen für Elektrofahrzeuge

Die FZV definiert keine eigene Fahrzeugklasse für Elektrofahrzeuge. Die heute am Markt erhältlichen Elektrofahrzeuge sind daher bislang hauptsächlich in den „klassischen“ Fahrzeugklassen M1 für PKW zu finden (bspw. Mitsubishi iMiEV) oder in der Klasse N1 für kleine Nutzfahrzeuge bis 3,5 t (bspw. EcoCarrier).

Mit den Klassen L 5e bis L 6e wurden nun Fahrzeugklassen geschaffen, die erstmals explizit die Möglichkeit eines Elektroantriebs mit einer maximalen Nutzleistung von bis zu 15 kW erwähnen. Sind leichte zwei- oder dreirädrige Kleinkrafträder mit bis zu 4 kW elektrischer Antriebsleistung im Rahmen der Bestimmungen der Fahrzeugklassen L 1e und L 2e noch recht problemlos und zuverlässig zu realisieren, so stößt man bei den Fahrzeugklassen L 5e/L 7e doch schnell an technische Grenzen bei der passiven Sicherheit.

Besonders kritisch ist die Fahrzeugklasse L 7e, die nur eine Begrenzung der Fahrzeugmasse (Leergewicht ohne Batterien 400 bzw. 550 kg) und der Motorleistung (15 kW) kennt, aber keine Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit. Geht man bspw. von einer Lithium-Ionen-Batterie mit 10 kWh Leistung aus, ergibt sich für ein solches Fahrzeug bei einem Batteriegewicht von rund 100 kg zuzüglich Fahrer (75 kg) eine Gesamtfahrzeugmasse

(Gesamtgewicht) von unter 600 kg. Bei einer Motorleistung von 15 kW kann dieses Fahrzeug innerhalb von 5–6 Sekunden auf 50 km/h beschleunigen und leicht eine Höchstgeschwindigkeit von über 100 km/h erreichen.

Diese Fahrzeuge gelten gemäß der Richtlinie trotzdem nur als dreirädrige Kraftfahrzeuge und müssen daher nur den technischen Anforderungen der Klasse L 5e genügen, sofern in den Einzelrichtlinien nichts anderes vorgesehen ist. Die Prüfumfänge und -nachweise für solche L 5e/L 7e-Fahrzeuge sind im Vergleich zu einem klassischen PKW (Fahrzeugklasse M1) deutlich geringer. Deshalb versuchen speziell chinesische Fahrzeughersteller, über diese Fahrzeugklassifizierung auf dem europäischen Markt Fuß zu fassen. So stammen über 90 % der sog. „Quads“ aus chinesischer Produktion.

Auch für Elektrofahrzeuge zeigt sich der Trend, die Fahrzeuge so zu designen bzw. auszulegen, dass sie noch in die Kategorie L 7e fallen. Beispiele dafür finden sich in Europa wie der AIXEM-Mega und der MUTE (TU München) oder der Tazzari-ZERO. Da an diese L 5e/L 7e-Fahrzeuge keine gesetzlichen Anforderungen für Crashesicherheits-Nachweise gestellt werden, bedeutet die mögliche Unfallkonstellation: „Frontalzusammenstoß L 7e-Fahrzeug mit einem deutlich schwereren PKW“ im Hinblick auf die inkompatiblen Fahrzeugmassen (600 kg vs. 1500–2000 kg) bei gleichzeitig fehlenden Airbags unfalltechnisch einen „worst case“. Deshalb fordert die Unfallforschung der Versicherer, dass die Sicherheitsstandards von Leichtkraftfahrzeugen an die von PKWs angepasst werden müssen. Leichtfahrzeuge sollten darüber hinaus serienmäßig mit aktiven und passiven Sicherheitselementen ausgerüstet werden. (GDV 2006)

5.2 Entwicklungsprozess

Seit seiner Erfindung vor mehr als 125 Jahren hat sich das grundlegende Konzept des Automobils nicht signifikant geändert und die Weiterentwicklung war eher evolutionärer Natur. Der Entwicklungsprozess eines Automobils jedoch war dramatischen Änderungen unterworfen. Was früher die Arbeit eines (einzelnen) herausragenden Ingenieurs über viele Jahre war, ist heute ein hochkomplexes, vernetztes Zusammenspiel von Spezialisten aus verschiedensten Disziplinen.

Die Synchronisation der dezentralen (Sub-)Prozesse der Entwicklung sowie deren komplexe gegenseitige Wechselwirkungen müssen auf einem relativ hoch aggregierten Level zentral gesteuert werden. Hierfür existiert keine generelle Lösung und die Planung und Kontrolle der Entwicklung bis in die untersten Prozessebenen bleibt aufgrund des steten Wandels des Prozesses, der Entwicklungspartner, der technischen Weiterentwicklungen der Komponenten und Systeme, der Märkte, der Kundenanforderungen und des stets verbleibenden Restrisikos noch nur teilweise realisierbar. Auf der operativen Ebene des Entwicklungsprozesses, selbst bei den effizientesten OEMs, läuft

die Entwicklung zu einem überraschend hohen Anteil auf einem Ad-hoc-Prozess. Dieser basiert eher auf den individuellen Erfahrungen der Mitarbeiter und der zu dem Zeitpunkt gegebenen Notwendigkeiten als auf einem methodisch sauber erstellten Entwicklungsplan. (Weber 2009)

Die Entwicklung eines Purpose-Design-Elektrofahrzeugs differenziert sich schon aufgrund seiner eigenständigen Architektur gegenüber dem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Darüber hinaus halten mit Elektro- und Hybridfahrzeugen zahlreiche „neue“ Komponenten und komplexe Systeme, vor allem im Bereich des Antriebsstrangs, Einzug in das Fahrzeug. Für diese fehlen z. T. Erfahrungswerte bei der Entwicklung, Fahrzeugintegration, Testing, Produktion, Montage sowie den Serviceanforderungen, was eine verlässliche Planung zusätzlich erschwert. Darüber hinaus erfordert die Entwicklung eines Elektrofahrzeugs ein interdisziplinäres System-Know-how und Expertise in den neuartigen Komponenten, die in den derzeitigen Strukturen eines OEMs zur Entwicklung eines konventionellen Fahrzeugs nicht bzw. nur unzureichend vorhanden sind.

Das etablierte Prozessmodell zur Entwicklung, das V-Modell in Abb. 5.1, erlaubt ein tieferes Verständnis des Zusammenspiels der verschiedenen Prozesse im Laufe der Fahrzeugentwicklung. Die Spezifikation des zu entwickelnden Fahrzeugs mit seinen gewünschten Eigenschaften bildet die Ausgangsbasis auf Gesamtfahrzeuglevel. Entlang des ersten Zweigs des V-Modells erfolgt auf der Ebene des Systems bis hin zur Komponente – ausgehend vom Gesamtfahrzeuglastenheft – die Spezifikation der Teilsysteme und deren simulative Überprüfung der Auslegung bis hin zum Einzelkomponentenlastenheft, die Konstruktion und Evaluation der Teile.

Auf dem zweiten aufsteigenden Ast des V-Modells erfolgt analog zum ersten Ast hierarchisch, nur diesmal in umgekehrter Reihenfolge, die Validierung der Einhaltung der Lasten, ausgehend von der Komponentenebene über die Systemtests bis hin zur Integration in das Gesamtfahrzeug. Der automobiler Entwicklungsprozess erfordert mehrere Stufen der Validierung in Prototypen unterschiedlichster Reifegrade. Jeder dieser Reifegrade repräsentiert einen eigenen kleinen Entwicklungsprozess in sich selbst, daher setzt sich das V-Modell für die Entwicklung von Fahrzeugen aus vielen untergeordneten V-Modellen zusammen. (Rausch und Broy 2008)

Neben dem rein technischen methodischen Ansatz des V-Modells ergeben sich weitere Anforderungen und Herausforderungen an einen modernen Entwicklungsprozess, die ständigen Änderungen unterliegen bzw. in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen haben:

- Effiziente, virtuelle, konzernintegrierte Entwicklungsumgebung (Zeit, Kosten, Qualität, Usability, Interoperability ...)
- Datenkonformität und -integrität
- Integrationsmanagement
- Komplexitätsmanagement
- Einsatz von Multi-CAD

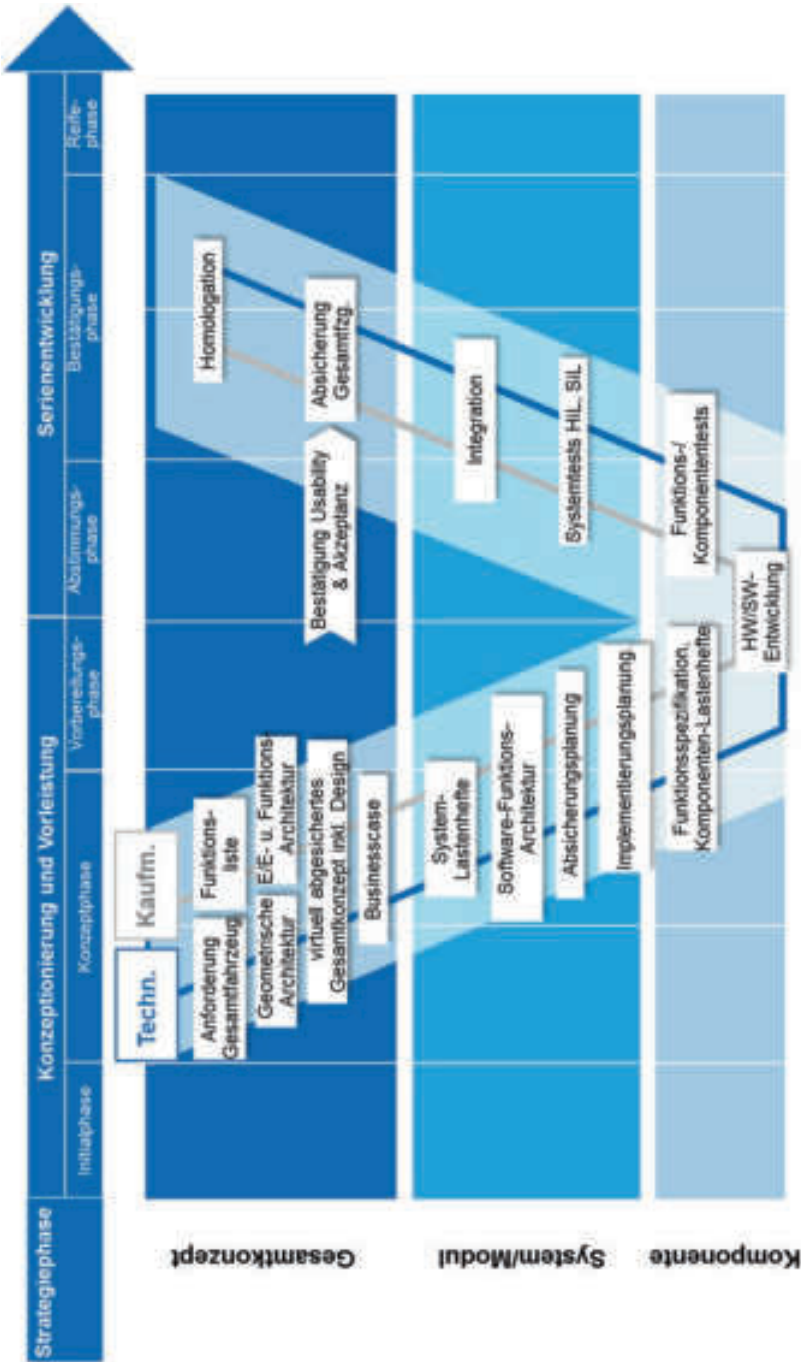


Abb. 5.1 V-Modell zur Produktentwicklung



Abb. 5.3 BOM als Struktur der virtuellen Entwicklungsumgebung

(s. Abb. 5.3) alle relevanten Informationen und erleichtert die Überwachung und das Datenmanagement in der Entwicklung:

- Spezifikationen
- Test- und Validierungsdaten
- Life-Cycle-Informationen
- Workflows
- Compliance-Informationen
- E/E- und Software-Informationen und -Daten
- Multi-CAD-Integration
- Digital Mock-up
- CAE-Daten
- Variantenmanagement und Produktkonfiguration
- Suppliermanagement
- Kosteninformationen
- Produktionsplanung
- Service-Informationen
- ...

5.3 Package für Elektrofahrzeuge

Das Package organisiert und harmonisiert die Anforderungen an die Bauräume, die Ergonomie und die Gesamteigenschaften eines Fahrzeugs und begleitet dieses von der Idee bis zum Serienanlauf. Dabei ist die Verwaltung der Gesamtfahrzeuggeometriedaten und die Sicherstellung ihrer Aktualität in jeder Entwicklungsphase ebenfalls Aufgabe des Packages.

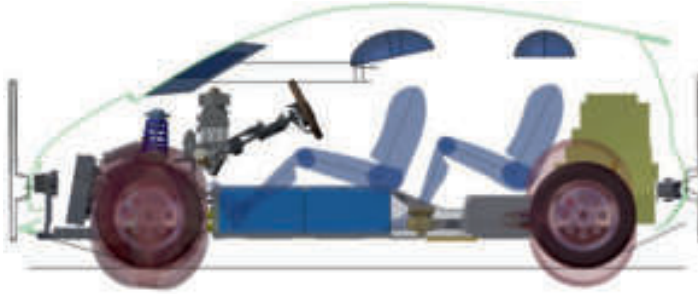


Abb. 5.4 Future Steel Vehicle 3-D-Package. (Quelle: Future Steel Vehicle [o. J.](#))

Da primär das Äußere eines Fahrzeugs die Blicke der Kunden auf sich zieht, Emotionen weckt und letztlich mit über den Kauf entscheidet, wird eine Designtrendbestimmung auf der Basis der ersten CAD-Modelle durchgeführt (s. Abb. 5.4). Die Herausforderung liegt darin, möglichst ideale Proportionen nicht nur anzustreben, sondern auch innerhalb der technischen, finanziellen und dimensionellen Vorgaben umzusetzen (Grabner und Nothhaft 2006).

Die ersten CAD-Modelle des Packageentwurfs werden maßgeblich bestimmt durch die Abmaße, die durch die Marktpositionierung des Fahrzeugs vorgegeben sind, die rechtlichen Bestimmungen sowie Komfort- und Sichtenanforderungen des Seating-Packages, den Strukturentwurf sowie die Komponenten und die Topologie des Antriebsstrangs und des Fahrwerks. Durch den Wandel bzw. die (teilweise) Ersetzung dieser Komponenten gegenüber dem „klassischen“ Packageentwurf des Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor verändert sich auch grundsätzlich der Packageentwurf für ein reines Elektrofahrzeug. Abb. 5.5 verdeutlicht den Bedarf der Anpassung des Packageentwurfs gegenüber dem konventionellen Entwurf mit zunehmender elektrischer Reichweite, ausgehend vom Full- und Plug-in-Hybrid über das Range-Extender-Fahrzeug hin zum reinen Elektrofahrzeug.

Besonders die neuen bzw. geänderten Komponenten des Antriebsstrangs, Batteriesystem, elektrischer Motor, Umrichter, Ladeinfrastruktur, Hoch-Volt-Bordnetz und Thermomanagement eines Elektrofahrzeugs sowie deren sichere Integration in das Fahrzeug machen ein gegenüber dem konventionellen Fahrzeug neuartiges und unkonventionelles Package notwendig. Abb. 5.6 zeigt die packagebestimmenden Komponenten in einer eher konventionellen Anordnung mit geringer elektrischer Reichweite.

Hierbei ist vor allem das Batteriesystem neben dem Seating-Package die bestimmende Komponente für die Auslegung des Packageentwurfs. Die Positionierung des Batteriesystems im (Unter-)Boden des Fahrzeugs ist aufgrund der Größe und des Gewichts des Systems aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und besonders unter sicherheitstechnischen Aspekten der zu bevorzugende Bauraum. Hierbei kann man zwischen drei Integrationsstrategien in den Boden unterscheiden (Abb. 5.7):

- Sandwichbodenintegration (bspw. StreetScooter)
- T-Shape (bspw. Opel Ampera)
- Verteilte (Split-)Anordnung (bspw. Mitsubishi iMiev)

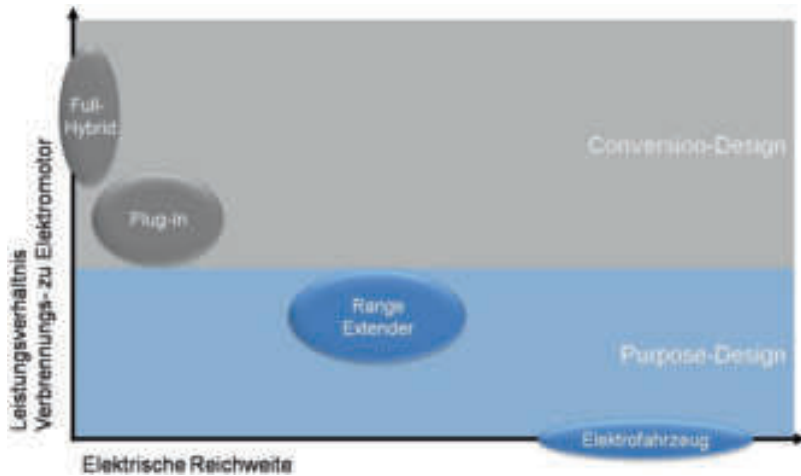


Abb. 5.5 Mit zunehmender Elektrifizierung des Antriebsstrangs steigt der Bedarf eines eigenständigen Purpose-Design-Packageentwurfs für Elektrofahrzeuge. (Quelle: Eigene Darstellung)

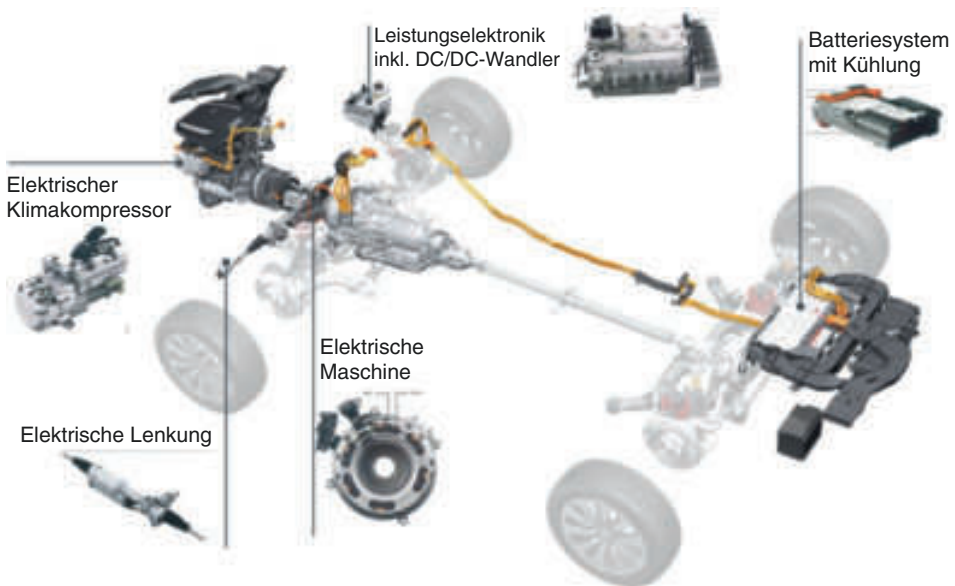


Abb. 5.6 Packagebestimmende Komponenten der Elektromobilität. (Quelle: Audi AG 2012)

Bei der Integration in den Fahrzeugboden kann durch einen Sandwich-Boden und unter Berücksichtigung der Crashstrukturen die maximale Fläche zur sicheren Integration des Batteriesystems genutzt werden. Weiterhin bietet dieser Ansatz das höchste Potenzial zur Ausnutzung von Synergieeffekten zwischen den Baureihen bzw. die kundenindividuelle Skalierung des Batteriesystems durch eine (geometrisch einfache Form der) Modularisierung des

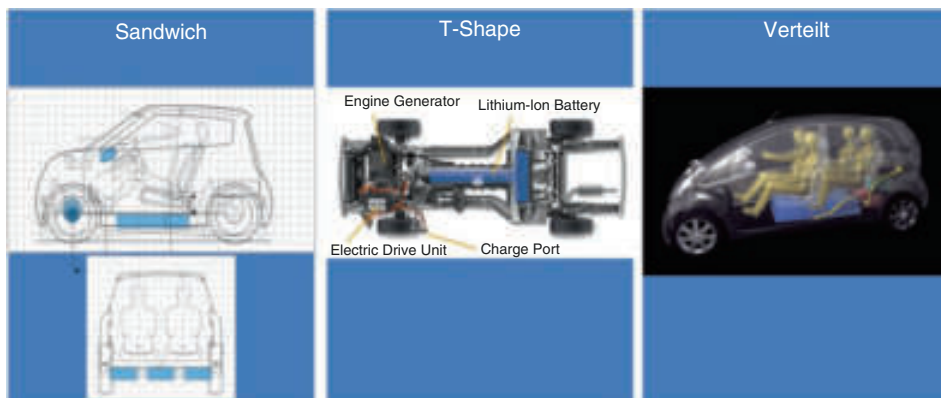


Abb. 5.7 Unterschiedliche Ansätze des Batteriepackages im Fahrzeugboden. (Quelle: RWTH Aachen 2009; Adam Opel AG 2012; Honda und Yoshida 2007)

Batteriesystems. Gerade weil das Batteriesystem mit zu den größten Kostentreibern im Fahrzeug gehört und die Stückzahlen derzeit noch begrenzt sind, ist dieser Ansatz gegenüber einer gesplitteten Anordnung der Batterien unter den Sitzen der Frontpassagiere und der Rücksitzbank (Packageraum für das Tanksystem bei konventionellen Fahrzeugen) bzw. der T-Anordnung (Getriebetunnel und unter der Rücksitzbank) der zielführende Ansatz für ein reines Elektrofahrzeug im Purpose-Design. Gegenüber der T-Shape- und der verteilten Anordnung der Batterie induziert die Sandwichbauform ein leicht höheres Fahrzeug, das bei der Umsetzung der Fahrzeugproportionen zu berücksichtigen ist.

Gleich bei allen drei Anordnungen ist die Auslegung auf den Seitencrash (besonders Pfahlaufprall) des Fahrzeugs. Ziel hierbei ist, eine Beschädigung des Batteriesystems im Crashfall zu vermeiden. Daher sehen alle Anordnungen eine ausreichend große Deformationszone mit Crashelementen und einer steifen Querabstützung vor.

Ein weiterer Vorteil der zentralen Anordnung des Energiespeichers sowie weiterer Hoch-Volt-Komponenten ist die Flexibilität der Antriebstopologie, die einen Front-, Heck- oder kombinierten Antrieb des Fahrzeugs mit 1–4 Maschinen mit kurzen Anbindungslängen des Hoch-Volt-Netzes erlaubt. Die derzeit häufigste Topologie ist eine Zentralmaschine mit Reduktionsgetriebe und mechanischem Differenzial im Front- bzw. Heckantrieb. Fahrdynamisch weist der Heckantrieb Vorteile gegenüber dem Frontantrieb auf, hat aber meistens einen kleineren Kofferraum zur Folge. Ebenfalls einen besonderen Einfluss auf das Package haben der Maschinentyp und die Realisierung des Differenzials. Die zentrale Maschine mit mechanischem Differenzial beansprucht hierbei den größten Bauraum. Durch den Einsatz von zwei Elektromotoren an einer Achse kann auf ein mechanisches Differenzial verzichtet und deutlich kompakter gebaut werden. Weitere Packagevorteile können realisiert werden, wenn die Elektromaschinen baulich geteilt in Richtung Rad als radnaher Antrieb ausgelegt werden. Der Freiheitsgrad im Package wird maximiert durch die vollständige Integration des Antriebs (und des Fahrwerks) in das Rad als Radnabenantrieb (Abb. 5.8).



Abb. 5.8 Beispiel für die unterschiedliche Integration der Elektromaschine. (Quelle: ZF Friedrichshafen AG 2001; Audi AG 2012; Michelin 2004)

Durch die Ausnutzung der neuen Gestaltungsmöglichkeiten des Packages für Elektrofahrzeuge ergeben sich somit (zukünftig) neue Designmöglichkeiten. Die vollständige Integration des Antriebs (Batteriesystem, Motor, Umrichter, Fahrwerk, ...) in die Bodengruppe scheint realisierbar und wird besonders bei der Modularisierung des Fahrzeugs als auch bei der Erschließung neuer Innenraumkonzepte dem Elektrofahrzeug neue Wege ebnen.

5.4 Funktionale Auslegung

5.4.1 Noise, Vibration, Harshness (NVH)

5.4.1.1 NVH – Aufgaben in den vergangenen Jahren

Die Akustik in Verbindung mit wahrnehmbaren Schwingungen, im Automobilbereich unter dem Sammelbegriff NVH (Noise Vibration Harshness) zusammengeführt, hat sich als ein wesentlicher Baustein erfolgreicher Fahrzeugentwicklung etabliert. Mit der sukzessiven Verringerung der verbrennungsmotorbedingten Innengeräusche in den letzten Jahrzehnten stieg ihre Bedeutung weiter an. Mit Fahrzeuginnengeräuschen werden Leidenschaft und Emotion vermittelt, die allgemeine Wertanmutung gesteigert und mitunter ein ganzes Produktimage inszeniert. Diese Möglichkeiten erkannten Automobilhersteller frühzeitig und entwickelten entsprechende Methoden und Werkzeuge zur NVH-Optimierung. Denn positive Erlebnisse sind die Basis für Kundenzufriedenheit und Markentreue.

Im Allgemeinen interessieren sich Kunden nicht für Normen und Vorschriften im Bereich des Komforts, er wird während der Fahrt multisensuell empfunden, bewertet und Attribute wie „billig“, „exklusiv“, „sportlich“ oder „luxuriös“ dem Produkt zugeordnet. Dabei ist für den akustischen Komfort nicht nur die Wechselwirkung von Hören und Schwingungsempfindung wichtig, sondern gleichfalls müssen der Kontext, die

Erwartungshaltung der Zielgruppe, das Produktimage und die generellen Produktassoziationen mit einbezogen werden.

Anfänglich bestand die wesentliche Arbeit der Akustikingenieure darin, die akustische Belastung durch das Motorengeräusch für die Insassen zu verringern und auf ein zumutbares Geräuschniveau zu bringen, d. h., den Schalldruckpegel am Insassenohr deutlich zu reduzieren.

Das Thema Geräuschqualität rückte dann Anfang der 1980er-Jahre vermehrt in den Fokus. Den Automobilherstellern wurde bewusst, dass Sound-Design mehr bedeutet, als nur den Schalldruckpegel zu reduzieren. Letztendlich musste konstatiert werden, dass viele Geräuschphänomene nicht mit einem Messmikrofon und reinen Schallpegelbetrachtungen identifiziert werden können. Die binaurale Messtechnik zur gehörrichtigen Aufnahme und Wiedergabe wurde damit ein fester Bestandteil im Prozess der Fahrzeugentwicklung (Genuit 2010). Ebenfalls hielt die Psychoakustik Einzug in die Fahrzeugakustik, mit deren Hilfe gehörbezogene Geräuschbewertungen vorgenommen wurden. Denn Geräuschphänomene wie Pfeifen, Brummen, Poltern, Wummern, Quietschen, Nageln können nicht auf der Grundlage zeitlich gemittelter Schalldruckpegel behandelt werden. Diese Geräusche beeinflussen ungeachtet ihres geringen energetischen Beitrags wesentlich die Gesamtbeurteilung des Fahrzeuginnengeräusches. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden umfangreiche Studien zur Geräuschqualität durchgeführt, in denen Aspekte der menschlichen Signalverarbeitung und der analytisch-physikalischen Bestimmung von Geräuschqualität unter zunehmender Berücksichtigung der Psychoakustik behandelt wurden. Dass das Thema auch zukünftig diskutiert werden muss, wie Abb. 5.9 schematisch verdeutlicht, liegt nicht nur an der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes. Das menschliche Gehör ist adaptiv und kann sich dem aktuellen Geräuschniveau anpassen. Es weist eine hohe Sensitivität für zeitliche und spektrale Muster nahezu ungeachtet des Schalldruckpegels auf.

Nachteilige Geräusche wie das Hinterachsheulen wurden bereits vor mehr als einem Jahrzehnt erfolgreich um einige dB reduziert. Damit konnte erreicht werden, dass das Geräusch durch andere Geräuschquellen maskiert und nicht mehr beanstandet wurde. Das Problem schien gelöst. Nachdem allerdings die Optimierung der Geräuschqualität im Fahrzeug fortschritt und verschiedene Geräuschquellen permanent optimiert wurden,



Abb. 5.9 Prozess der Fahrzeuggeräuschoptimierung

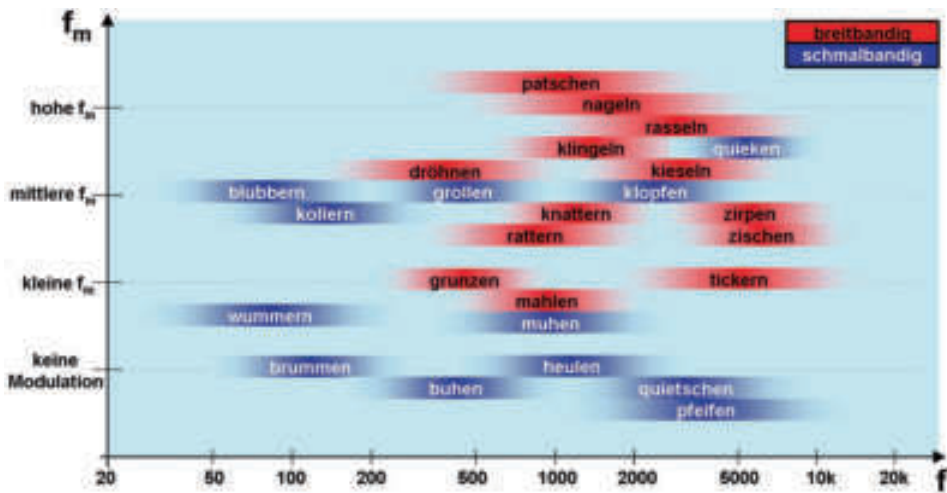


Abb. 5.10 Typische Störgeräusche im Bereich NVH und deren charakteristische Eigenschaften (Bandbreite, Modulationsfrequenz, spektrale Ausprägung)

resultierend in einem leiseren Gesamtgeräusch, ist das Geräuschphänomen Hinterachs-heulen wieder verstärkt wahrzunehmen und verlangt nach neuer Optimierung. Dies gilt für alle Geräuschphänomene im Fahrzeuginnenraum. Die Reduzierung des akustischen Beitrags einer Geräuschquelle führt zur Hörbarkeit anderer Geräuschquellen, die unter Umständen dann ebenfalls der Optimierung bedürfen. Auf vorhandene ungewollte Geräusche zu reagieren und diese mittels „Troubleshooting“ zu minimieren bzw. zu beseitigen, prägte die Arbeit der Akustikingenieure in den letzten Jahrzehnten (s. Abb. 5.10). Aktuelle Anforderungen im Bereich des akustischen Komforts verlangen allerdings auch nach gestalterischen Überlegungen, es muss aktiv am resultierenden Geräuscherlebnis im Fahrzeug gearbeitet werden.

5.4.1.2 NVH in Zukunft

Obwohl die Prävention und Behandlung von Störgeräuschen nach wie vor zu den Kernaufgaben des Akustikingenieurs zählt, rückt das aktive Gestalten der Akustik vermehrt in den Vordergrund. Durch den Wegfall des Verbrennungsmotors bei alternativen Antrieben ist das Potenzial gegeben, signifikant die Lautstärke des Fahrzeuginnengeräusches zu reduzieren. Dadurch könnten sich auch die Anforderungen an das Sound-Engineering dramatisch ändern: Die sukzessive und stetige Optimierung des Verbrennungsmotors wird abgelöst. Das Fahrzeuginnengeräusch muss nun aktiv „komponiert“ und akustische Feedbacks müssen vollkommen neu gestaltet werden. Der Übergang von klassischen Aufgaben in den Bereichen akustischer Komfort, NVH und Sound-Design zu neuen Herausforderungen und Konzepten ist dabei fließend. (Genuit und Fiebig 2011)

Grundsätzlich erfordern strengere EU-Abgasbestimmungen bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung im Spannungsfeld hoher Umweltverträglichkeit eine enge Zusammenarbeit mit

Motorenherstellern (Pletschen 2010). Gefordert werden Downsizing, kleinere, leichtere Fahrzeuge, hoch aufgeladene Motoren, Hybridantrieb und vollständige Elektrotraktion. Alle diese Entwicklungen werden neue NVH-Konfliktsituationen hervorrufen. So kann bspw. die parallele Existenz des elektrischen und verbrennungsmotorischen Antriebs in Hybrid-Fahrzeugen zu Geräusch- und Schwingungsproblemen führen, die aus herkömmlichen Automobilen nicht bekannt sind. Betriebsgeräusche der elektrischen Antriebskomponenten und das Betriebsverhalten des Verbrennungsmotors mit plötzlichem Starten und Abschalten sind ungewohnt. Insgesamt sollte ein harmonisches, unauffälliges Zusammenspiel dieser Geräuschquellen realisiert werden, das auch die Betrachtungen von Vibrationsanregungen umfasst (Genuit und Fiebig 2007). Wichtig dabei ist, dass stets als integrativer Bestandteil der Mess- und Analyseketten das Hören eingebunden wird. Nur so lässt sich sicherstellen, dass Maßnahmen und Modifikationen tatsächlich die intendierte Wirkung entfalten. Daher ist der Einsatz binauraler Mess- und Wiedergabetechnik unverzichtbar. Daneben werden psychoakustische und weitere gehörbezogene Analysen benötigt, die wichtige Informationen über Intensität, Charakter, spektrale Verteilung und zeitliche Struktur spezieller Geräuschphänomene bereitstellen.

Für die Ableitung zielgerichteter konstruktiver Maßnahmen ist es zwingend erforderlich, Geräuschquellen und Übertragungswege detailliert zu kennen. Hier findet das Verfahren der Transferpfadanalyse Anwendung (Genuit et al. 1997). Durch die Trennung von Quelle und Übertragungsweg wird nicht nur eine zuverlässige Identifikation der Ursachen für akustische Konflikte ermöglicht, sondern sogar mit Hilfe der binauralen Transferpfadsynthese (BTPS) ist eine gehörmäßige Abschätzung des Potenzials simulierter Modifikationen möglich. Damit lässt sich sicherstellen, dass vorgeschlagene Modifikationen hörbar die gewünschte Wirkung erzielen. Erfolgreiches NVH und Sound-Design sind also nur zu erreichen, wenn vorhandene Methoden und Werkzeuge aufeinander abgestimmt und im Hinblick auf das Erlebnis des Gesamtfahrzeugs eingesetzt werden.

5.4.1.3 Fahrzeuginnengeräusche

Trotz der deutlichen Reduzierung des Innengeräuschpegels beim Elektrofahrzeug aufgrund des Wegfalls eines Verbrennungsmotors können zahlreiche akustische Konfliktsituationen auftreten. So sind bspw. störende Stromrichtergeräusche im hochfrequenten Bereich zu befürchten, deren Hörerlebnis im Kontext von Fahrzeuginnengeräuschen ungewohnt ist. Neben der konstanten Schaltfrequenz des Stromrichters entstehen drehzahlabhängige Seitenbänder. Der resultierende Sound ist unangenehm und lästig.

Ferner werden der Elektromotor und das Getriebe als wesentliche Geräuschquellen akustisch optimiert werden müssen. Die elektromagnetischen Ordnungen des Elektromotors können deutlich wahrnehmbar sein (engl. whine noise). Dies wird oft mit dem Sound einer Straßenbahn verglichen, aus der eben jenes Geräuschmuster hinreichend bekannt ist. Dass diese Phänomene nicht isoliert betrachtet werden dürfen, soll im Folgenden verdeutlicht werden.

Zur exemplarischen Illustration zukünftiger NVH-Themen werden die Ergebnisse aus einer Untersuchung an einem Hybridfahrzeug-Prototyp kurz vorgestellt. Mit Hilfe diverser

Prüfstandsmessungen wurde ein integriertes Transferpfadmodell vom untersuchten Fahrzeug erstellt, in dem die einzelnen Geräuschpfade durch Übertragungsfunktionen beschrieben und die entsprechenden Geräuschbeiträge durch Filterung im Betrieb gemessener Quellsignale synthetisiert wurden. Auf diese Weise lassen sich die Geräuschanteile der einzelnen Quellen und die Übertragungswege separat analysieren. Das Transferpfadmodell wurde um die Synthetisierung von Vibrationen an den wesentlichen Kontaktstellen erweitert, um die Problematik von Geräusch- und Schwingungskonflikten bei Hybridfahrzeugen angemessen zu berücksichtigen und realistische Simulationen im Fahr Simulator zu ermöglichen.

Abb. 5.11 zeigt ein Teilergebnis der binauralen Transferpfadanalyse in einer *FFT-über-Zeit*-Darstellung. Die Fast-Fourier-Transformation (FFT) erlaubt die Transformation aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich. Die ermittelten Frequenzspektren können, über der Zeit dargestellt werden, wobei die Amplituden der Frequenzen farbkodiert werden. Zu sehen sind die Anteile des Elektroantriebs für den Luft- und Körperschall am Innengeräusch. Die Spektrogramme verdeutlichen bereits, dass die durch Magnetkräfte verursachten höheren Ordnungen vom Elektromotor zwischen 500 Hz und 2 kHz nicht nur als Körperschall, sondern auch als Luftschall übertragen werden (Sellerbeck und Nettelbeck 2010). Darüber hinaus ist erstaunlicherweise zu konstatieren, dass derartige Geräuschkomponenten ebenfalls vom Umrichter abgestrahlt werden, zusätzlich zu den zu erwartenden Schaltfrequenzen. Nähere Untersuchungen am Fahrzeug ergaben, dass das Verbindungskabel zwischen Umrichter und Elektromotor eine wesentliche Körperschallbrücke war. Dadurch wirkte das Umrichtergehäuse als „Lautsprecher“ für die Elektromotorgeräusche. Durch den Einsatz eines weniger steifen Kabels könnte diese Geräuschübertragung reduziert werden.

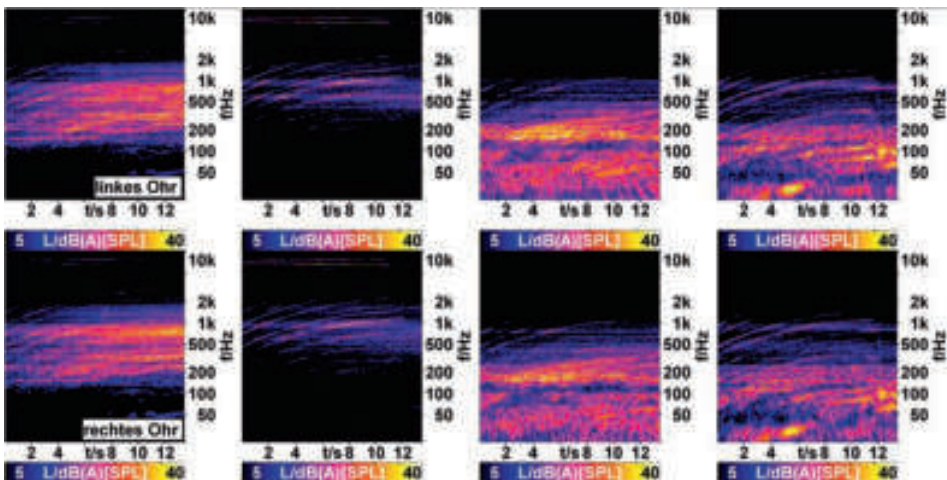


Abb. 5.11 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektroantriebs am Innengeräusch bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km/h. Von links nach rechts: Luftschallbeitrag des Elektromotors, Luftschallbeitrag des Umrichters, Körperschallbeitrag der Antriebswellen, Körperschallbeitrag des Elektromotors, FFT über Zeit

Mit Hilfe der in Abb. 5.11 skizzierten Analysen können bereits erste Anforderungen für Maßnahmen zur Optimierung der Geräuschqualität abgeleitet werden. Die Geräuschanteile lassen sich für die Erarbeitung detaillierter Modifikationsvorschläge weiter spezifizieren. Abb. 5.12 schlüsselt bspw. die Geräuschanteile des Elektromotors, die über Körperschall in den Innenraum gelangen, für die entsprechenden Motorlager für die x-, y- und z-Richtungen auf. Der Vorteil ist, dass die relevanten Geräuschmuster unmittelbar einzelnen Pfaden bzw. Koppelstellen zugeordnet werden können. Es kann bspw. abgeleitet werden, dass die störenden höherfrequenten Ordnungen des Elektromotors (whine noise) hauptsächlich über das Motorlager 1 übertragen werden. Ferner wird ein auffälliger Schalleintrag um 50 Hz über die y-Richtung übertragen. Ein tieffrequentes Brummen wird im Bereich um 20–30 Hz in x- und z-Richtung übertragen, womit auf eine Nickbewegung des gesamten Aggregats um die y-Achse geschlossen werden kann.

Weiterhin wird es im zukünftigen Sound-Engineering erforderlich sein, sich detailliert mit dem akustischen Beitrag des Umrichters auseinanderzusetzen, um einen hohen akustischen Komfort gewährleisten zu können. Abb. 5.13 zeigt links oben den akustischen Hauptbeitrag des Umrichters am Fahrerohr. Die erste Ordnungsanalyse verdeutlicht, dass für das Umrichtergeräusch der einfache Bezug zur Motordrehzahl nicht adäquat ist. Die fächerförmigen Ordnungen (Seitenbänder) um die Schaltfrequenz des Umrichters sind gut zu erkennen, sie stellen letztlich ein Nebenprodukt der Pulsweitenmodulation dar. Die Ordnungen des Umrichters verlaufen nicht proportional zur Motordrehzahl ($n \cdot \text{Drehzahl}/60$), sondern stellen sich als geschwungene Kurvenverläufe im konventionellen Ordnungsspektrum dar. Mit Hilfe einer Ordnungsanalyse, bei der die Schaltfrequenz des Umrichters als „Frequenzversatz“ eingestellt wird, lässt sich eine weitere sinnvolle Ordnungsanalyse

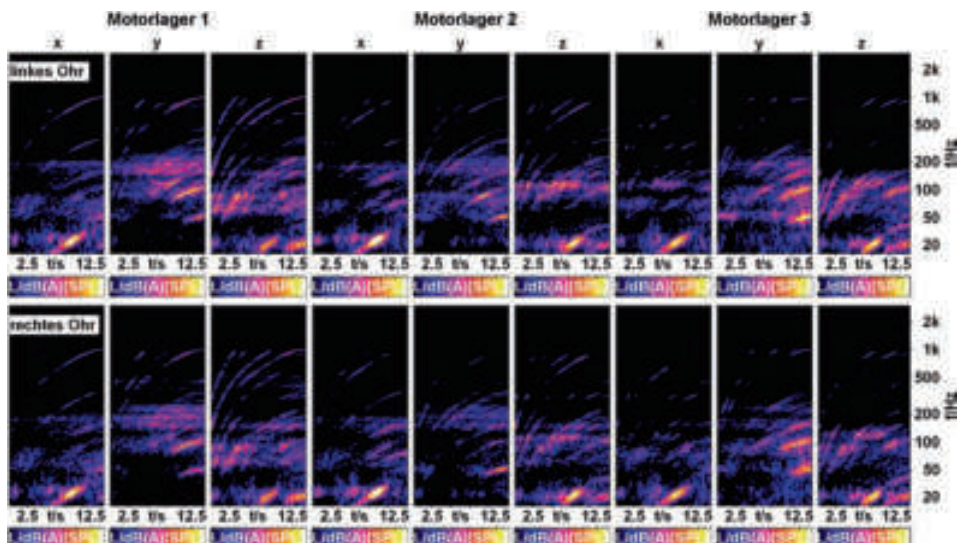


Abb. 5.12 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektromotors (Körperschall über Motorlager) am Innengeräusch (Beschleunigung von 0 auf 50 km/h), FFT über Zeit

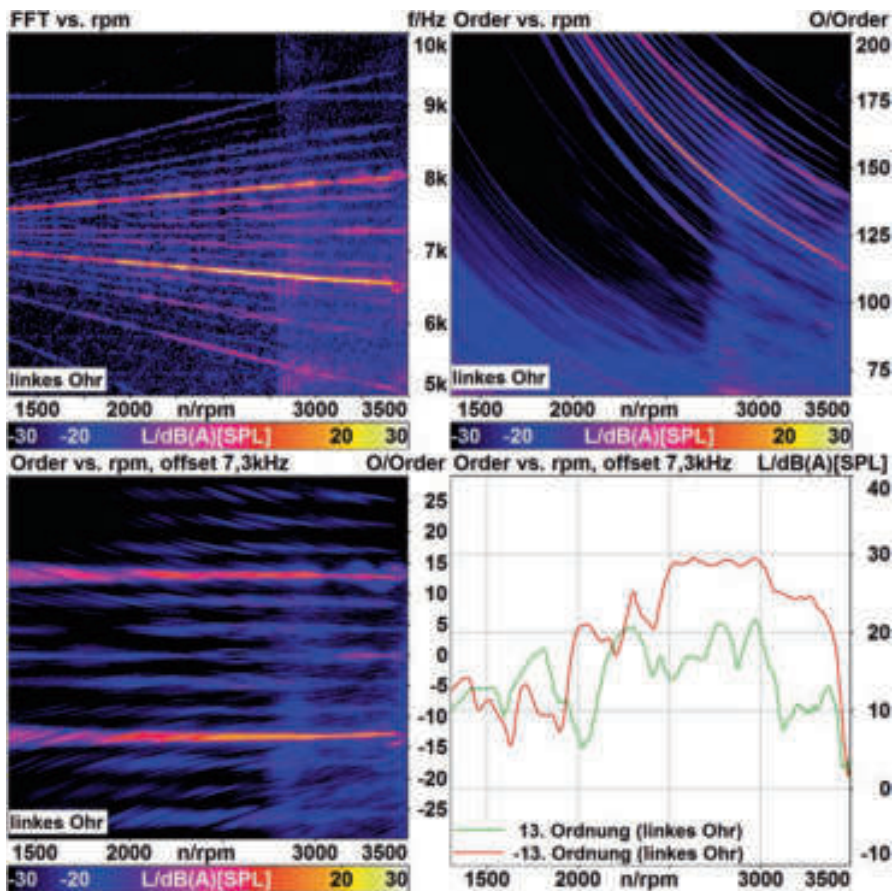


Abb. 5.13 Spektrogramme vom originalen Innengeräusch (Zoom in den höherfrequenten Bereich) für das linke Ohr; von oben links nach unten rechts: FFT über Drehzahl, Ordnungsspektrum über Drehzahl, Ordnungsspektrum mit Frequenzversatz (7,3 kHz) über Drehzahl, Ordnungspegel über Drehzahl (mit Frequenzversatz von 7,3 kHz)

durchführen. Die Ordnungen können im Gegensatz zur Betrachtung ohne Versatz nun auch negativ sein, da einige Ordnungen mit steigender Drehzahl eine Abnahme der Frequenz aufweisen. Das Ordnungsspektrum mit einem Frequenzversatz von 7,3 kHz zeigt unmittelbar, dass die (um die Schaltfrequenz des Umrichters verschobenen) 13. Ordnungen am auffälligsten sind. Der Abstand der Seitenbänder (26 Ordnungen) entspricht der Polpaarzahl des verwendeten Elektromotors, d. h., pro Umdrehung werden 26 Polpaare durchlaufen. Die Darstellung der relevanten Ordnungspegel ermöglicht schließlich eine detaillierte Einschätzung der Bedeutung dieser akustischen Beiträge.

Die Vorteile eines umfangreichen Transferpfadmodells liegen in der direkten technisch-analytischen sowie hörbaren Abschätzung der Auswirkungen bestimmter Modifikationen. Abb. 5.14 zeigt eine sukzessive virtuelle Optimierung, in der zuerst die Entkopplung des

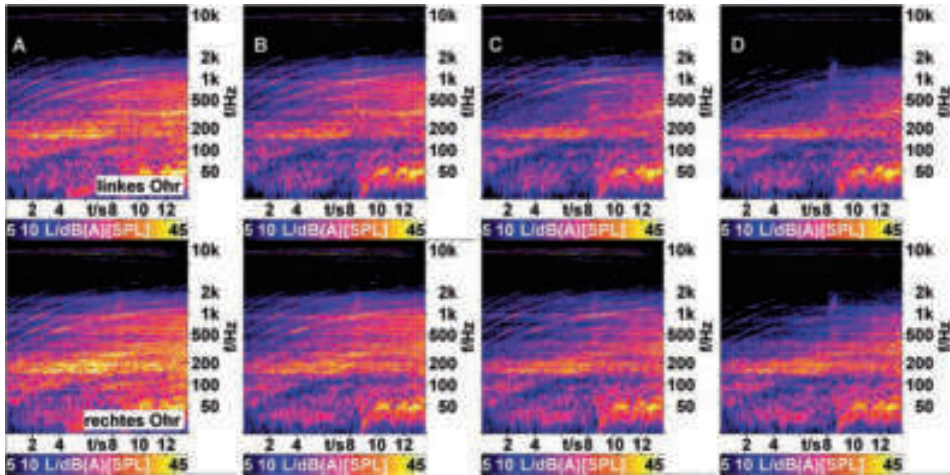


Abb. 5.14 Spektrogramme vom originalen Innengeräusch (A) und von simulierten Optimierungsmaßnahmen (B: Optimierte Lagerung des Elektromotors, C: B und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Elektromotors, D: B, C und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Umrichters) für eine Beschleunigung von 0 auf 50 km/h, FFT über Zeit

Elektromotors unter Einbeziehung der Lager- und Struktursteifigkeiten verbessert wurde. Dadurch ließ sich bereits eine höhere Isolation in einem weiten Frequenzbereich erreichen. Ferner wurden Luftschallkapselungen von Elektromotor und Umrichter simuliert. Obwohl die Kapselung des Umrichters (Änderung von C zu D) nur zu einer Schalldruckpegelabnahme von 1 dB führte, zeigt das Spektrogramm die deutliche Reduzierung des Stromrichtergeräusches um 7 kHz, verbunden mit einer erheblichen hörbaren Verbesserung der Geräuschqualität. (Genuit und Fiebig 2011)

Eine Herausforderung im Bereich des akustischen Komforts bei alternativen Antrieben ist es, Analysen zu entwickeln, die eine zuverlässige Identifikation von perzeptiv auffälligen spektralen und zeitlichen Mustern erlauben. Da der Schalldruckpegel im Innenraum leiser Fahrzeuge weiter als akustischer Indikator an Bedeutung verlieren wird, werden psychoakustische Größen benötigt, die eng mit dem Geräuschqualitätsempfinden verbunden sind. Diese werden als Zielgrößen im Fahrzeugentwicklungsprozess stärkere Anwendung und Verbreitung finden. Gerade die adäquate Analyse wahrgenommener Tonhaltigkeit wird aufgrund der höherfrequenten Beiträge von Elektromotor, Umrichter oder von auffälligen Getriebegeräuschen besonders relevant sein.

Neben der beschriebenen Vorgehensweise zur Verbesserung der Innengeräusche von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, in denen Störgeräusche und unerwünschte Geräuschmuster reduziert werden, bedarf es zur Optimierung des akustischen Komforts grundsätzlich konzeptioneller Überlegungen. Gerade die konzeptionelle Gestaltung und Auslegung von Innengeräuschen von Elektrofahrzeugen erscheint noch vollkommen offen. Wie können Image und Markenkenntwerte akustisch vermittelt werden? Sollte nur der vorhandene Elektromotorsound akustisch optimiert werden?



Abb. 5.15 Fahrsimulatoren; *links*: stationärer Fahrsimulator (mit Videoprojektion), *rechts*: mobiler Fahrsimulator (auf der Straße)

Eine einfache Aufrechterhaltung des vorhandenen Elektrosounds greift zu kurz. Markendifferenzierung, Emotionalisierung und Fahrfreude lassen sich damit nur bedingt forcieren. Die Verwirklichung von Konzepten, die vom konstruktionsbedingt gezielten Einbringen von speziellen Sounds und Geräuschkomponenten bis hin zur vollständig künstlichen Erschaffung eines Fahrgeräusches reichen können, ist grundsätzlich denkbar. Derartige Entwicklungen werden stärker denn je an intendierte Leitmotive gekoppelt werden, kreierte Geräuschkulissen im Spannungsfeld von Komfort und Emotion. Fahrsimulatoren, wie in Abb. 5.15 exemplarisch dargestellt, müssen zur Ermittlung der gewünschten Innengeräusche eingesetzt werden. (Genuit 2008)

Um eine geeignete Geräuschkulisse für zukünftige Automobile erarbeiten zu können, bedarf es neben der Anwendung verschiedener Simulationswerkzeuge auch der Anwendung kontext-sensitiver Methoden, die der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes gerecht werden. Beispielsweise erlaubt das Verfahren Explorative-Vehicle-Evaluation (EVE) eine kontext-sensitive Datenerhebung sowie eine Ableitung von kundenorientierten Zielgeräuschen (Genuit et al. 2006). Hierbei findet die Datenerhebung im realistischen Umfeld Fahrzeug statt und Versuchsteilnehmer können frei und spontan Eindrücke, Impressionen, Empfindungen und Assoziationen äußern. Verbalisierte Urteile werden mit den dazugehörigen fahrzeug-technischen und akustischen Daten aufgezeichnet und zusammen mit weiteren Informationen aus zusätzlichen Interviews ausgewertet (Fiebig et al. 2005).

Letztendlich können geeignete Sounds für zukünftige Fahrzeuge aber nur mit gezielter interdisziplinärer Zusammenarbeit gefunden und erfolgreich realisiert werden.

5.4.1.4 Fahrzeugaußengeräusche

Die Thematik zukünftiger Außengeräusche ist Bestandteil kontroverser Diskussionen und gesellschaftlich weitreichender Debatten. Grundsätzlich ist mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Individualverkehrs bzw. dem Aufkommen neuer alternativer Antriebskonzepte die Hoffnung verbunden, innerstädtischen Straßenverkehrslärm erheblich und nachhaltig zu reduzieren. Abb. 5.16 zeigt, dass bei geringen Geschwindigkeiten von einer Verringerung der akustischen Emission aufgrund des elektrischen Antriebs ausgegangen werden kann. Der Schalldruckpegelverlauf verdeutlicht, dass bei dem gemessenen Hybridfahrzeug (HEV) bei Wegfall des verbrennungsmotorischen Antriebs eine Pegelreduktion bis zu 10 dB möglich

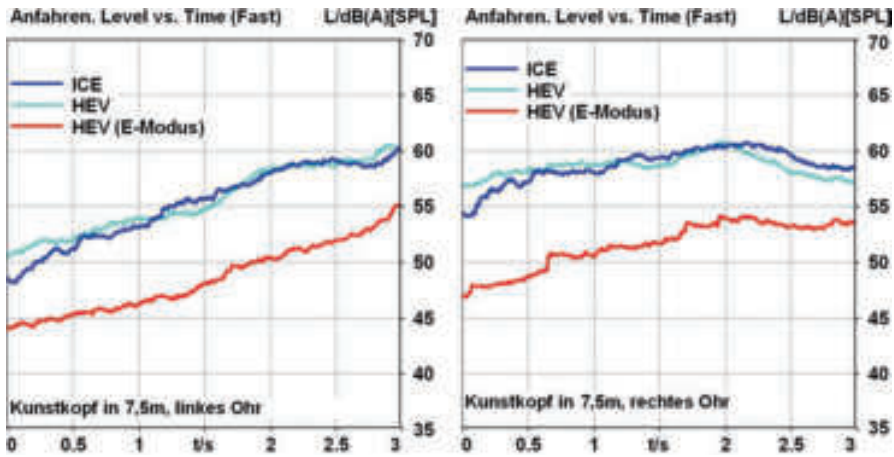


Abb. 5.16 Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation, Schalldruckpegel über Zeit

ist. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich die Reduzierung erheblich, da das Reifen-Fahrbahngeräusch dominant wird. Bei Geschwindigkeiten von über 30 km/h ist die Verringerung des Schalldruckpegels bereits zu vernachlässigen.

Allerdings ist mit der Pegelreduktion des Außengeräusches nicht automatisch von einer erheblichen Reduzierung der Lästigkeit von Straßenverkehrsgerauschen auszugehen. Einerseits ist eine tatsächliche Pegelverringerung nur für geringe Geschwindigkeiten zu erwarten. Andererseits sind im Außengeräusch des Elektrofahrzeugs auffällige Geräuschkomponenten zu konstatieren, die lästig und störend sind. Abb. 5.17 zeigt das Außengeräusch eines Serienfahrzeugs für eine Anfahrtsituation. Deutlich sind die durch die Magnetkräfte des Elektromotors bedingten höheren Elektromotor-Ordnungen im Frequenzbereich zwischen 2–4 kHz zu erkennen.

Darüber hinaus ist ein sehr störendes Stromrichtergeräusch um 7 kHz festzustellen. Hier laufen die Ordnungen auseinander, wodurch eine permanente Änderung der Modulation stattfindet. Dieses akustische Muster wiederholt sich um 14 kHz.

Ein diffiziles und heftig diskutiertes Thema im Bereich des Außengeräusches zukünftiger Kraftfahrzeuge betrifft die vermeintliche Gefahr des Überhörens leiser Fahrzeuge. Ein erhöhtes Gefahrenpotenzial für Kollisionen mit Fußgängern ermittelte die US-amerikanische NHTSA, die über den Zeitraum von 2000–2007 Unfallstatistiken auswertete (NHTSA 2009). Auf der Grundlage dieser Studie werden zur Gefahrenvermeidung akustische Warnsignale befürwortet. Die tatsächliche Aussagekraft dieser viel zitierten Studie wird allerdings kontrovers diskutiert und deren methodische Schwächen vielfach angemahnt (Sandberg et al. 2010). Ungeachtet dessen haben die USA und Japan bereits Gesetze zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegeln verabschiedet. Auch die UNECE empfiehlt die Entwicklung eines Warnsystems zur besseren Hörbarkeit von leisen Fahrzeugen (UNECE 2011). Das primäre Ziel ist es, dem Wunsch der generellen Vermeidung von Verkehrstoten erheblich näher zu kommen. Dennoch

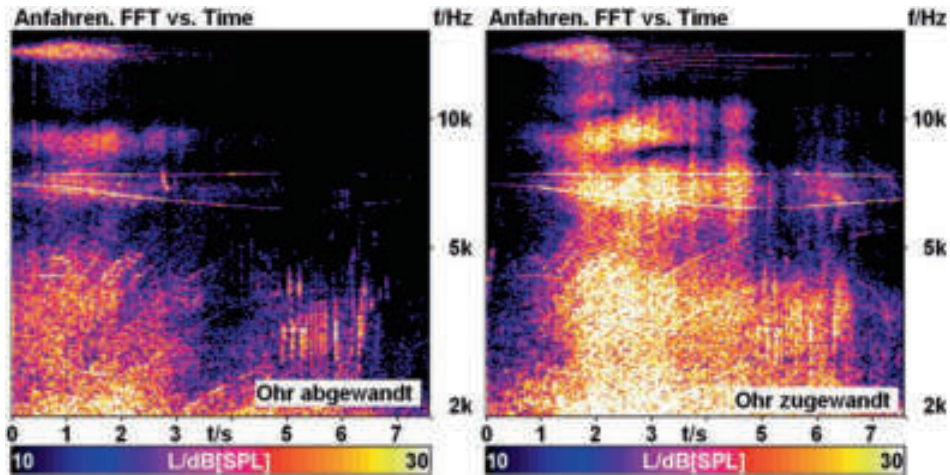


Abb. 5.17 Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation eines Elektrofahrzeugs (Serienfahrzeug), FFT über Zeit

müssen effiziente Lösungen erarbeitet werden, die ein Minimum an unnötigem Lärm verursachen. Denn aktuelle Studien der WHO führen aus, dass jedes Jahr in Folge von gesundheitsschädlichen Auswirkungen durch Verkehrslärm in Europa eine Mio. Lebensjahre „verloren“ gehen und 1,8 % aller Herzinfarkte Verkehrslärm zuzurechnen seien (WHO 2011). Daher bedarf es der Entwicklung seriöser Konzepte und intelligenter Lösungen fernab eines überstürzten Aktionismus, die weit über die einfache Emission von akustischen Signalen im Bereich niedriger Geschwindigkeiten hinausgehen müssen. (Genuit 2011)

5.4.1.5 Ausblick

Akustikingenieure sehen sich mit neuen Herausforderungen bei steigenden Komfortansprüchen und zunehmendem Wettbewerbsdruck konfrontiert. Neben den notwendigen Bemühungen zur Emissionsreduktion im Prozess der Fahrzeugentwicklung wird weiterhin die Erfüllung emotionaler Bedürfnisse von potenziellen Kunden einen besonderen Stellenwert einnehmen. Dabei spielen der empfundene akustische Komfort und das Thema NVH eine außerordentlich essenzielle Rolle. Geräusche werden permanent bewusst oder unbewusst registriert und interpretiert und erste Empfindungen manifestieren sich unmittelbar in einem schwer zu korrigierenden Qualitätseindruck. Daher wird aktives Sound-Design zunehmend erforderlich werden: konzeptionell die Akustik gestalten anstatt nur auf ungewollte Geräusche zu reagieren. Denn ein Fahrzeug wird nicht nur gefahren, es wird – auch oder gerade bei zukünftigen neuartigen, alternativen Antrieben – multisensorisch erlebt und danach bewertet. Es geht nicht allein darum, die Geräusche des Elektromotors, Umrichters oder Getriebes zu optimieren, vielmehr muss die Gesamtkomposition harmonisch abgestimmt werden. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Vor diesem Hintergrund stehen die Ingenieure im Automobilbereich vor einer besonderen Revolution in der Aufgabenstellung. Nach einer über 120-jährigen kontinuierlichen Entwicklung im Automobilbereich, in der der Verbrennungsmotor schrittweise optimiert wurde, kommen neue Antriebs- und Energieversorgungskonzepte auf sie zu, die neuer Betrachtungsweisen bedürfen.

5.4.2 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

5.4.2.1 Einführung

Für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen ist der Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von großer Bedeutung. Neben dem konventionellen Bordnetz müssen Systeme zur Speicherung der elektrischen Energie, Steuerung und elektrischer Antrieb auf einer wesentlich höheren Spannungsebene in das Fahrzeug integriert werden. Die Kopplung zwischen den verschiedenen Netzwerken im Fahrzeug sowie der weiteren Umgebung führt zu anspruchsvollen Herausforderungen bei der Realisierung der EMV.

Ein Elektroantrieb enthält bspw. einen leistungsstarken Umrichter, der EMV-Probleme verursachen kann, sowie einen Energiespeicher, der diese Leistung bereitstellen kann. Dieser Energiespeicher (bei Elektro- und Hybridfahrzeugen) ist die sogenannte HochVolt-Batterie, nach heutigem Entwicklungsstand ein Lithium-Ionen-Batteriepaket mit einer Nenngleichspannung zwischen 100 und 800 Volt und in Anwendungen von der L7e Klasse bis zum 26-Tonner und Linienbussen.

Erfahrungen im Umgang mit derart hohen Gleich- und Wechselspannungen liegen bei den Entwicklern konventioneller Fahrzeuge, die mit Bordspannungen von 12/14 Volt (PKW) bzw. 24/28 Volt (Nutzfahrzeuge) arbeiten, noch nicht vor. In Elektrofahrzeugen können daher hohe elektrische Feldstärken auftreten, die evtl. andere Systeme beeinflussen. Noch gravierender sind die zu erwartenden magnetischen Felder, die durch die hohen, von leistungsstarken elektrischen Antriebsmotoren hervorgerufenen Ströme entstehen. Bei Antriebsleistungen von 15 bis 800 kW sind Ströme von bis zu 1500 Ampere zu erwarten. Zusätzlich werden in Plug-In Hybride und Elektrofahrzeuge zukünftig die HochVolt Batterien mit Leistungen von bis zu 350 kW geladen. Dies geschieht kabelgebunden, induktiv oder über Pentagraphen z. B. in Linienbussen. Da die hiermit geschalteten elektrischen Leistungen um Größenordnungen über den bisher im Auto auftretenden Leistungen liegen, verursachen sie auch wesentlich größere Störungen, die bei fehlerhaften Entwicklungen oder Prüfungen von Komfortfunktionen bspw. das Infotainmentsystem beeinflussen können. Riskanter wären diese Störungen bei Steuergeräten mit Sicherheitsfunktionen wie dem ABS/ESP oder bei Passagieren eines Lineienbusses, der an einer Haltestelle Zwischengeladen wird. Ohne geeignete EMV-optimierte Maßnahmen besteht die Gefahr, dass die gesetzlich zulässigen Grenzwerte, u. a. für den Personenschutz, überschritten werden. Zusätzlich ist ein hohes Störpotenzial zu erwarten, das von den für die Ansteuerung der Antriebsmotoren erforderlichen leistungsstarken Frequenzumrichtern ausgeht, die die von der Fahrzeugbatterie gelieferte Gleichspannung in eine für die Antriebsmotoren geeignete Wechselspannung

umwandeln. Ferner sind Gleichspannungswandler erforderlich, die die Batteriespannung von 100 bis 800 Volt in eine konventionelle 12/14-Volt-Bordnetzspannung transferieren, über die die Fahrzeugkomponenten versorgt werden. Nicht zu vergessen sind die geschirmten Leistungsleitungen, die eine kapazitive Kopplung zur Fahrzeugmasse über den Schirm darstellen. Weitere Störquellen sind Spannungswandler im Fahrzeug für das 1- bis 3-phasige konduktive (leitungsgebundene) Laden der Hochvolt-Batterien bis hin zu induktiv gekoppelten Ladegeräten oder Pentagraphen. Zudem gibt es außerhalb vom Fahrzeug konduktive Wechselspannungs- und Gleichspannungsladestationen, die aus dem Versorgungsnetz oder auch aus stationären Speichern die Ladeleistung bereitstellen. Fachleute erwarten eine Verdopplung der Störpotenziale durch elektromagnetische Felder alle zwei Jahre.

Die internen Taktfrequenzen der Frequenzumrichter und Gleichspannungswandler sind Quellen für potenzielle elektromagnetische Störungen. Daher benötigt die Störfestigkeit gegen elektromagnetische Störstrahlung große Aufmerksamkeit. Derzeit liegen keine Erfahrungen vor, inwieweit kompakt aufgebaute Lithium-Ionen-Batteriepakete empfindlich auf elektromagnetische Strahlung reagieren. Bekannt ist, dass bspw. sehr nah an den Leistungsleitungen verbaute Elektronik besonders gegen Störstrahlungen geschützt werden muss und auch dem Masse-Konzept in Hochvolt-Batterien ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Aufgrund der hohen Komplexität, einer deutlich höheren Spannungsebene gegenüber den konventionellen Bordnetzen und schnelleren Schaltvorgängen von leistungselektronischen Systemen mit höheren Strömen können die EMV-Anforderungen des Gesamtsystems im Fahrzeug nur erfüllt werden, wenn man diese vorerst auf Komponenten- bzw. Systemebene detailliert und die EMV-Eigenschaften auf diesen Ebenen gezielt entwickelt. Die Einhaltung der EMV muss bei der Integration in das Gesamtfahrzeug erhalten bleiben.

Die Verantwortung dafür, dass das Fahrzeug in der elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß funktioniert, liegt beim Hersteller. Moderne elektronische Systeme machen Kraftfahrzeuge immer komfortabler und sicherer. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die vielen elektronischen Einrichtungen, wie ABS, ESP, e-Gas, Navigationssystem, Abstandskontrollsystem oder Airbagsteuerung, nicht gegenseitig in ihrer Funktion beeinflussen. Zukünftig werden diese Systeme durch autonome Fahr-Funktionen deutlich steigen, weil leistungsstarke Steuergeräte Live-Daten in Bruchteilen von Sekunden verarbeiten und beurteilen müssen. Die Herstellungskosten der Elektrik/Elektronik liegt bei den aktuellen Elektrofahrzeugen schon über 50 % und wird für autonom fahrende Fahrzeuge noch deutlich steigen. Das reibungslose Zusammenwirken elektronischer Systeme im Kfz stellt sehr hohe Ansprüche an die EMV. Aus diesem Grund verlangen die Automobilkonzerne sehr oft von den Zulieferern die Prüfung ihrer elektrischen/elektronischen Unterbaugruppen nach wesentlich schärferen Prüfkriterien als für die Typenzulassung (z. B. e1, CE, ECE R10) vorgeschrieben ist. Die Zulieferer wiederum geben den Druck an die Bauteillieferanten, wie bspw. Halbleiterhersteller, weiter und fordern von den verwendeten ICs, die sehr oft als Ursache für Störungen gesehen werden, ein hohes Maß an Störfestigkeit und gleichzeitig eine geringe Störemission (Abb. 5.18).

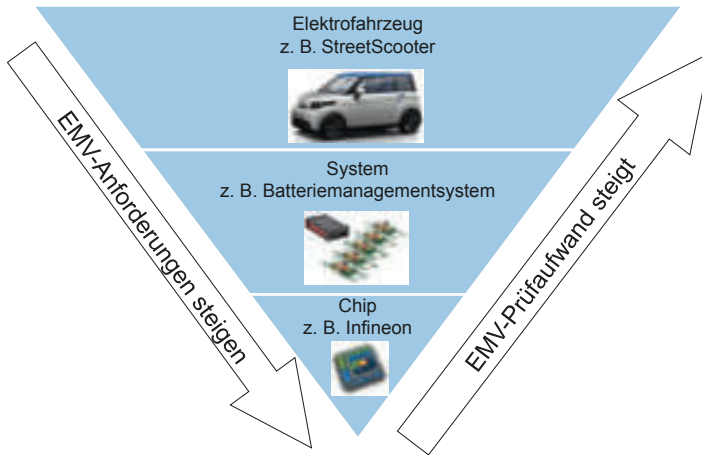


Abb. 5.18 EMV-Anforderungen steigen mit dem Integrationsgrad

Für die EMV-Prüfung von ICs (Integrierten Schaltungen) werden zwei Normen, IEC 61967 und IEC 62132, zur Messung der Störemission bzw. der Störfestigkeit herangezogen.

Für die Typgenehmigung sind jedoch nur die gesetzlichen Mindestanforderungen nachzuweisen. Aus Gründen der Produkthaftung des Herstellers gegenüber dem Endkunden werden in den Pflichtenheften der Automobilhersteller Prüffeldstärken gefordert, die ein Vielfaches über jenen der Richtlinie 2004/104/EG, ergänzt durch die Richtlinien 2005/49/EG, 2005/83/EG, 2006/28/EG und 2009/19/EG, liegen. Alle Bauteile vom Stecker bis zum Kabel müssen geschirmt sein, um Kopplungseffekte mit anderen elektrischen oder elektronischen Komponenten im Fahrzeug zu verhindern. Sämtliche Leitungen zwischen Batterie, den Schaltteilen bis zum Motor müssen hochfrequenzdicht sein.

Der Nachweis der Erfüllung der EMV-Anforderungen erfolgt in der Kraftfahrzeugentwicklung vorzugsweise auf Labor- und Fahrzeugebene. Die Komponenten werden einerseits in einer Fahrzeugnachbildung und andererseits im realen Fahrzeug getestet. Dies hat für elektrisch angetriebene Fahrzeuge zur Folge, dass Mess- und Prüfverfahren, Messaufbauten zur Nachbildung der Fahrzeugumgebung und ggfs. Messgeräte neu spezifiziert werden müssen. Außerdem sind EMV-relevante Betriebszustände des Antriebssystems zu ermitteln. Gerade beim Anfahren und Bremsen entstehen hohe Stromspitzen, die durch schnelle Schaltvorgänge zu breitbandigen Störspektren führen. Als weiteres Hilfsmittel dient die Modellierung und Simulation der Komponenten und des Gesamtsystems. Simulationen bieten die Möglichkeit, in der Entwicklung zu sehen, wo die höchsten Feldstärken auftreten und wo das günstigste Routing der Leitungen liegt. Abschirmungs- und Filtermaßnahmen verursachen enorme Kosten für die Automobilhersteller. Neu entwickelte Simulationsmodelle helfen, im Vorfeld mögliche Koppelpfade und Störquellen zu identifizieren und zielgerichtet geeignete Maßnahmen wie Materialauswahl und Filterung zu ergreifen. Mit Hilfe von virtuellen Untersuchungen können Entwicklungsentscheidungen

in der Konzeptphase getroffen werden. Offene Fragen werden sehr früh analysiert und Parameterstudien „kostenlos“ durchgeführt. Bei den Berechnungen können große Ungenauigkeiten auftreten. Daher sind alle Ergebnisse auf ihre Sinnhaftigkeit zu hinterfragen.

Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Fahrzeug mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit bei allen im praktischen Betrieb zu erwartenden Einwirkungen elektromagnetischer Störbelastungen (Smartphones, WIFI-Hot-Spots, Rundfunk-/Fernsehsender, RFID, NFC) keine Funktionsstörungen zeigt.

Elektrofahrzeuge weisen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor gravierende, bisher nicht zu berücksichtigende EMV-Aspekte auf, eine verschärfte Herausforderung für die Entwickler. Der Fokus liegt dabei auf zwei Arbeitsfeldern: Störaussendung und Störfestigkeit der Elektrofahrzeuge selbst sowie die Störaussendung und Störfestigkeit von konduktiven (leitungsgebundenen) und induktiven Ladestationen (kontaktlose Ladetechnik). Neben der Notwendigkeit, spezifisches neues Know-how aufzubauen und die Weiter- und Fortbildung in diesem Bereich auszubauen, sind erhebliche Investitionen in die Entwicklung einer an die neuen Anforderungen angepassten EMV-Prüfumgebung unumgänglich.

Anforderungen der Störabstrahlung und Störeinstrahlung sind nicht nur für ein Elektrofahrzeug und damit auch für ein Hybridfahrzeug gültig, sondern bestehen im gleichen Maß für alle beteiligten Systemkomponenten. Nur wenn man diese Anforderungen erfüllt, kann die elektromagnetische Verträglichkeit dieser Fahrzeuge gewährleistet werden.

5.4.2.2 Historische Entwicklung

Seit den Anfängen des Automobils ist die Anzahl der Steuer- und elektronischen Geräte im Fahrzeug ständig gestiegen und in der Folge die Höhe des Störpegels und die Wahrscheinlichkeit, eine Störung zu finden. Zudem ist die Größe der elektronischen Geräte immer weiter gesunken und damit die elektrische Packungsdichte gestiegen (s. Abb. 5.19). Dadurch rücken die Störsenken immer näher an die Störquellen heran und die geringere Leistungsaufnahme erhöht die Empfindlichkeit gegenüber Störungen.

Auch die Taktfrequenz wurde ständig weiter erhöht und mit der Einführung von Digitaltechnik auch die Flankensteilheit. Daraus ergeben sich ein höherfrequenterer Störpegel und die Erhöhung des Störbandes (breitbandiger).

Bei den elektrischen Einbauten ins Fahrzeug bis 1970 ging es im Wesentlichen um die Entstörung von Zündung und Elektromotoren. Weitere elektrische Highlights aus der Fahrzeug-entwicklungsgeschichte skizziert Tab. 5.3.

Durch den VDE wurden 1934 Leitsätze der Funkentstörung eingeführt. Richtlinien zur Störfestigkeit folgten erst Mitte der 1960er-Jahre. In Abb. 5.20 ist die geschichtliche Entwicklung der EMV-Gesetzgebung aufgelistet.

Mit der zukünftigen EMV-Entwicklung und der daraus resultierenden Normierung und Prüfung speziell für die Elektrofahrzeugentwicklung beschäftigt sich die Nationale Plattform für Elektromobilität (NPE) in ihren Arbeitskreisen. Sie hat eine Roadmap für die Anpassung der Normen bis 2020 für die Themen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs (s. Abb. 5.21 und 5.22) zusammengestellt und wird diese umsetzen. Verantwortlich für die Umsetzung ist u. a. die DKE.



Abb. 5.19 Erhöhung der Packungsdichte am Beispiel des elektronischen Bremssystems

Tab. 5.3 Elektrische Highlights aus der Fahrzeugentwicklungsgeschichte

Jahr	Entwicklung
1958	Bendix erstes elektronisches Einspritzsystem (USA)
1967	Bendix erstmals im Einspritzsystem des VW 1600 E übernommen von Bosch (D-Jetronic)
1973	K-Jetronic von Bosch im Porsche 911
1974	L-Jetronic im Opel Manta GTE
1978	Serienstart des ersten ABS 2 bei Mercedes-Benz und kurz darauf bei BMW
1979	Motronic, Zusammenführung von Zünd- und Einspritzsystem
1986	Elektronisches Gaspedal hält Einzug
1991	Teilvernetzung beim Serienstart W 140
1995	Serienstart des Elektronischen Stabilitäts-Programms ESP®
1997	Vollvernetzung Class A und Class B CAN Bus im W 210 (E-Klasse)
1997	Serienstart von Hoch-Volt und elektrischer Antriebsmaschine im Toyota Prius Hybridfahrzeug
2002	Serienstart VW Phaeton mit mehr als 2100 Einzelleitungen und 3800 m Länge Bordnetz und mehr als 60 Steuergeräten an 3 Bussystemen mit mehr als 2500 Signalen
2008	Serienstart des Tesla Roadster Elektrospportwagens mit 215 kW elektrischer Antriebsleistung
2009	Serienstart des Mitsubishi i-MIEV mit 49 kW elektrischer Antriebs- und bis zu 50 kW DC-Ladeleistung
2010	Serienstart des Nissan Leaf mit 80 kW elektrischer Antriebs- und bis zu 50 kW DC-Ladeleistung
2012	Serienstart des Tesla Model S Elektrofahrzeuglimousine mit bis zu 400 kW Leistung

Abb. 5.20 Geschichtliche Entwicklung der EMV-Gesetzgebung

Standard	Organisation	Fahrzeug relevant	Einführung
ECE R10	EG	Ja	1958
72/245/EWG	EG	Ja	1972
89/336/EWG	EG	Ja	1989
95/54/EG	EG	Ja	1995
95/56/EG	EG	Nein	1995
ECE R10 Rev. 2	EG	Ja	1997
97/24/EG	EG	Ja	1997
2000/2/EG	EG	Ja	2000
2002/24/EG	EG	Ja	2002
2003/77/EG	EG	Ja	2003
2004/104/EG	EG	Ja	2004
2005/49/EG	EG	Ja	2005
2005/83/EG	EG	Ja	2005
2006/28/EG	EG	Ja	2006
ISO 7637	ISO	Nein, Komponente	1995–2004
ISO 10605	ISO	Ja	2008
ISO 11451	ISO	Ja	2005–2007
ISO 11452	ISO	Nein, Komponente	1997–2007
ISO 10605	ISO	Ja	2008
CISPR-12	IEC	Ja	2007
CISPR-25	IEC	Ja	2008
SAE J551	SAE	Ja	1995–2003
SAE J1113	SAE	Ja	1995–2002

EMV wird im Kontext von Normung nur auf Antriebs- und auf Gesamtsystemebene betrachtet – dies schließt die Batterie ein. Handlungsbedarf wird darin gesehen, die Prüfung unter definierten Lastzuständen durchzuführen und die Anforderungen an Störfestigkeit und Feldstärke an den technischen Fortschritt anzupassen. Dafür wurde die ECE 10 Revision 5 im Oktober 2014 veröffentlicht.

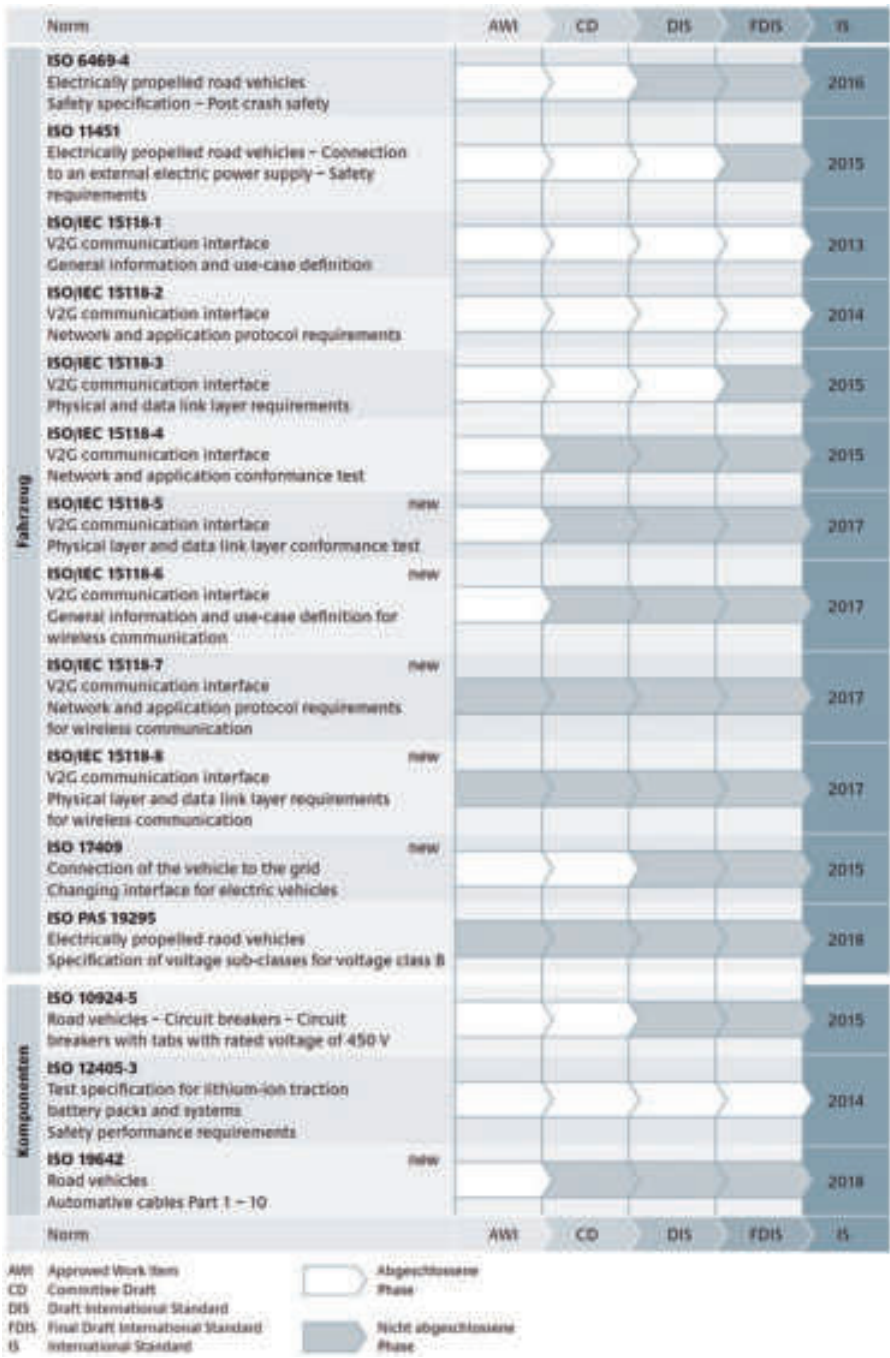


Abb. 5.21 Status der wichtigsten Normungsprojekte von Elektrofahrzeugen Stand August 2014. (Quelle: NPE 2014)

Standards		NP	CD	CDV	FDIS	IS
Ladetechnologien	IEC 61851-1 Ed. 3: Electric vehicle conductive charging system General requirements					2015
	IEC/TS 61851-3-1 new EV conductive power supply system General Requirements for LEV AC and DC conductive power supply systems					2017
	IEC/TS 61851-3-2 new EV conductive power supply system – Requirements for LEV DC off-board conductive power supply systems					2017
	IEC/TS 61851-3-3 new EV conductive power supply system Requirements for LEV battery swap systems					2017
	IEC/TS 61851-3-4 new EV conductive power supply system Requirements for LEV communication					2017
	IEC 61851-21-1 EV conductive charging system EV on-board charger EMC requirements for conductive connection to a.c./d.c. supply					2015
	IEC 61851-21-2 EV conductive charging system EMC requirements for Off-board EV charging systems					2015
	IEC 61851-23 new Ed. 2: EV conductive charging system DC EV charging station					2017
	IEC 61851-24 new Ed. 2: EV conductive charging system Digital communication between a d.c. EV charging station and an EV for control of d.c. charging					2016
	IEC 61980-1 Electric vehicle wireless power transfer systems (WPT) General requirements					2015
	IEC/TS 61980-2 new EV WPT systems Specific requirements for communication between EV and infrastructure with respect to WPT systems					2017
	IEC/TS 61980-3 new EV WPT systems – Specific requirements for the magnetic field power transfer systems					2017
	IEF 67763 Standards charging of electric road vehicles (IC-CPD)	NP	CD	CDV	FDIS	IS

Abb. 5.22 Status der wichtigsten Normungsprojekte von Ladestationen Stand August 2014.
(Quelle: NPE 2014)



Sonstiges	IEC 60364-7-722 Low voltage electrical installations – Requirements for special installations or locations – Supply of EV						2015
	IEC/TS 61439-7 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Assemblies for specific applications such as marinas, camping sites, market squares, EV charging stations						Publiziert
	IEC 62196-1 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of EV – General requirements						Publiziert
	IEC 62196-2 Ed. 2: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of EV – Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories						2015
	IEC 62196-3 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of EV – Dimensional compatibility and interchangeability requirements for d.c. and a.c./d.c. pin and contact-tube vehicle couplers						Publiziert
	IEC/TS 62196-4 Plugs, socket-outlets, and vehicle couplers Conductive charging of EV – Part 4: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c., d.c. and a.c./d.c. vehicle couplers for Class II or Class III light electric vehicles (LEV)						2017
	IEC 62831 User identification in EV Service Equipment using a smartcard						2017
	IEC 62893 Charging cables for EV	new					2017
	23E/853/NP Residual Direct Current Monitoring Device to be used for Mode 3 charging of EV (RDC-MD)	new					2017
	Standards	NP	CD	CDV	FDIS	IS	
NP New Work Item Proposal		 Abgeschlossene Phase					
CD Committee Draft		 Nicht abgeschlossene Phase					
CDV Committee Draft for Vote							
FDIS Final Draft International Standard							
IS International Standard							
EV Electric Vehicle							
LEV Light Electric Vehicle							
WPT Wireless Power Transfer							

Abb. 5.22 (Fortsetzung)

In diesem Zusammenhang sind auch EMV-Normen zu beachten, die zusammen mit der CISPR behandelt werden. Ein Teil dieser Normen muss um neue Normteile ergänzt werden. Besonderheiten sind entsprechend den Fahrzeugkategorien zu beachten, bspw. bei Kategorie M3.

5.4.2.3 EMV-Design

Innerhalb der Elektromobilität und dem autonomen Fahren werden immer mehr elektrische und elektronische Komponenten (elektrischer Antrieb, Frequenzumrichter, Hoch-Volt-Batterie, Hochleistungsrechner) mit immer höherer Leistung auf immer

kleinerem Raum konzentriert. Gleichzeitig steigen die Taktfrequenzen von Steuergeräten und Antriebselektronik. Das Risiko der gegenseitigen Beeinflussung und der damit verbundenen Funktionsbeeinträchtigungen steigt.

Das übliche Störkopplungsmodell geht wie eben beschrieben von den Begriffen Störquelle, Kopplungspfad und Störsenke aus. Die Störungen erzeugenden Fahrzeugkomponenten oder solche aus der Umgebung wie Funkmasten werden als Störquelle und die beeinflusste Komponente als Störsenke bezeichnet (s. Abb. 5.23). Damit es zu einer Beeinflussung der Senke durch die Quelle kommen kann, muss die Störung zur Senke gelangen. Den Weg zwischen Quelle und Senke nennt man Kopplungspfad. Kriterium der Güte einer Signalübertragung ist in der EMV der Störabstand (s. Abb. 5.24).



Abb. 5.23 Elektromagnetische Umwelt im Kraftfahrzeug



Abb. 5.24 EMV-Beeinflussungsmodell

Damit eine Störung entstehen kann, müssen grundsätzlich drei Voraussetzungen erfüllt sein:

- es muss eine Störquelle geben
- es muss eine Störsenke geben
- es muss einen Kopplungspfad zwischen den beiden geben

Auch wenn die oben genannten Bedingungen erfüllt sind, kommt es erst dann zu einer Störung, wenn die Beeinflussung die Störfestigkeit einer Komponente überschreitet. Die „elektromagnetische Beeinflussung“ hat größtenteils erst bei höheren Frequenzen Auswirkungen. Dies bedeutet, dass die sachgemäße Funktion eines Elektrofahrzeugs nur dann erreicht werden kann, wenn der Einbau ins Fahrzeug neben den betriebstechnischen Anforderungen auch die Anforderungen der Hochfrequenz (bspw. Erdung, Schirmung, Filterung) erfüllt. Mögliche EMV-Beeinflussungen in einem Fahrzeugsystem sind in Abb. 5.25 zu sehen.

Frequenzumrichter können wesentlich höhere elektromagnetische Störungen (bis zu Faktor 100) als das herkömmliche 12 V Bordnetz erzeugen. Die folgende Liste nennt EMV-Werte, die im Fahrzeug vorkommen können, in Verbindung mit elektromagnetischen Wechselwirkungen fahrzeugeigener Systeme. Außerdem sind gewollte Ausstrahlungen von Sendegeräten im eigenen Fahrzeug enthalten, die Störimpulse auf dem Fahrzeugbordnetz bzw. bei den Sensorleitungen verursachen. Es muss also ein EMV-Schutz von Empfängern im eigenen Fahrzeug (Nahbereichsstörung) vor diesen Sendern implementiert werden.

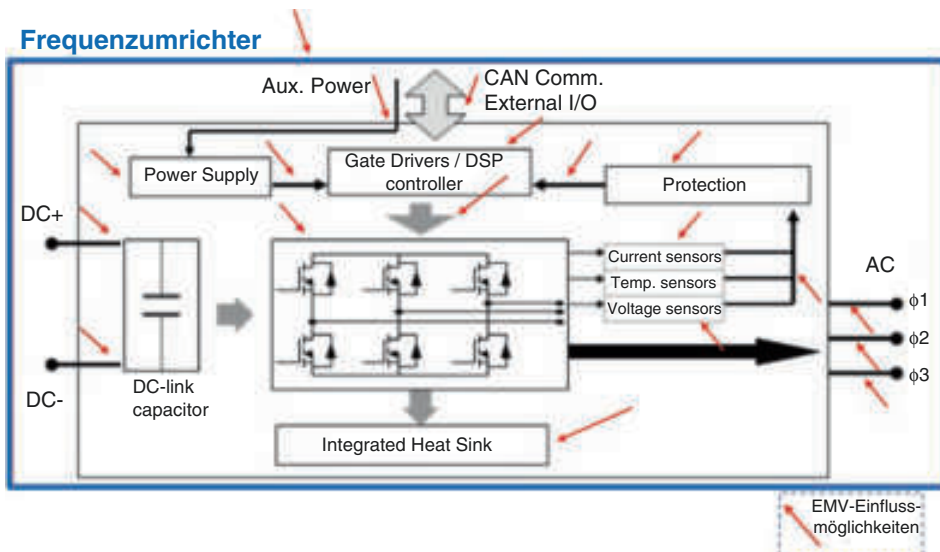


Abb. 5.25 Umrichter, Regelkreis und EMV-Einflussmöglichkeiten

- Störimpulse: bis 160 V
- Empfängerempfindlichkeit: 250 nV
- Störfeldstärken: bis 85 V/m
- Elektrostatische Entladungen: bis 30 kV

5.4.2.4 Kopplungsarten

Die Spannungsversorgung der Fahrzeugsysteme erfolgt aus einem gemeinsamen 12/14-Volt-Bordnetz. Die Leitungen der einzelnen Systeme werden meist in einem gemeinsamen Kabelbaum geführt. Dabei kann es über galvanische, kapazitive, induktive oder elektromagnetische Kopplungen zu Störbeeinflussungen benachbarter Systeme kommen (Abb. 5.26).

Vor allem die Ermittlung der Kopplungsmechanismen und -pfade ist sehr schwierig, da es sich oft um parasitäre Übertragungswege (Streukapazitäten, Streuinduktivitäten) handelt. In der Regel liegen mehrere Kopplungspfade gleichzeitig vor. Besonders auffällige Punkte sind die Alterungen der Steckverbinder, die durch Stecken oder Fahrzeugvibrationen eine Erhöhung des Übergangswiderstandes bis zum 10-Fachen BoL zu EoL aufweisen. Dadurch werden auch Schirmwirkungen über Lebensdauer stark reduziert.

In der EMV wird zwischen verschiedenen Kopplungsarten wie den leitungsgeführten und abgestrahlten Störungen unterschieden (vgl. Tab. 5.4).

Die gestrahlten Störungen werden bspw. als elektromagnetisches Feld auf die Stör- senke übertragen und dort bspw. von einem als Antenne fungierenden Leiter empfangen.

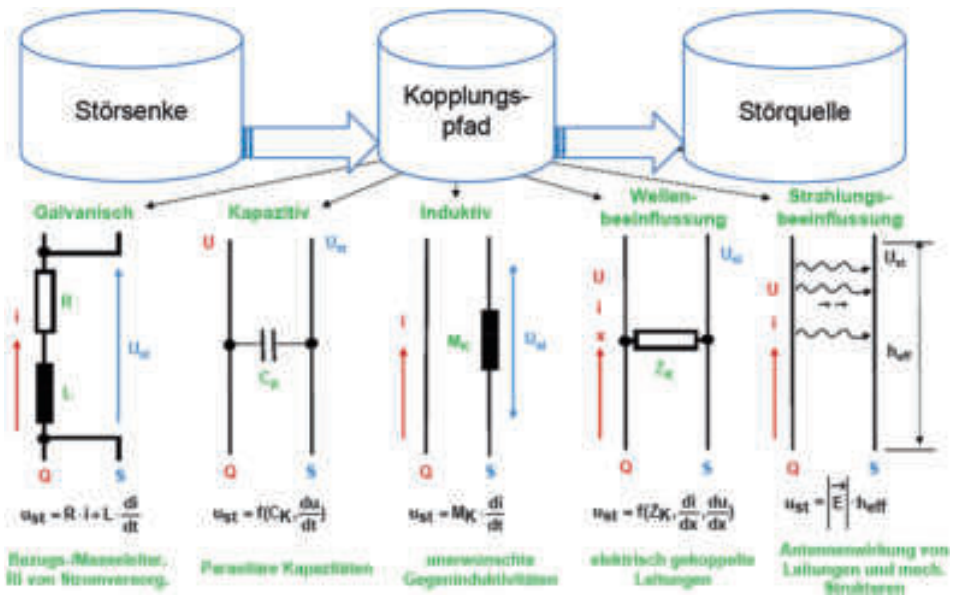


Abb. 5.26 Die verschiedenen Kopplungsmechanismen der Koppelpfade

Tab. 5.4 Störungsphänomene

Kopplungsmechanismus	Störfestigkeit	Störaussendung
abgestrahlt	Hochfrequente Feldeinkopplung (V/m)	Nahentstörung (dBμV) Fernentstörung (dBμV)
leitungsgeführt	Störimpulsfestigkeit (V) Elektrostatische Entladung ESD (kV)	Störimpulsaussendung (V)

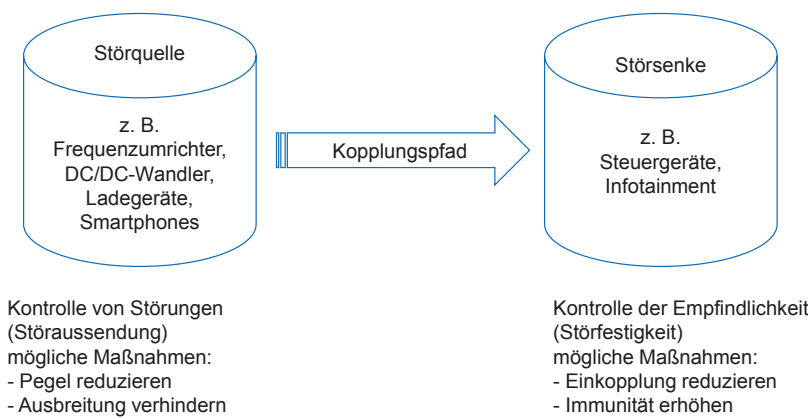


Abb. 5.27 Störquellen und Maßnahmen

Auch kapazitive und induktive Beeinflussungen elektrischer bzw. magnetischer Felder werden als feldgebundene Störungen bezeichnet.

Ein Beispiel für eine feldgebundene Störung ist die Einkopplung einer GSM-Mobiltelefon-Übertragung in eine Audioeinrichtung, bspw. in ein Autoradio. Grund dafür kann ein nicht ausreichend geschirmter Lautsprecher oder ein Kabel sein. Weiterhin ist der Einfluss der Varianten auf die EMV relevant: Varianten wie Sonnendach, Materialien in den Scheiben, unterschiedliche Thermo-Systeme wie HV-PTC-Heizer, Wärmepumpe, unterschiedliche Reifen-Leitfähigkeit, Scheibenenteisungssysteme und unterschiedliche Bordnetze haben großen Einfluss auf das EMV-Verhalten des Gesamtsystems (Abb. 5.27).

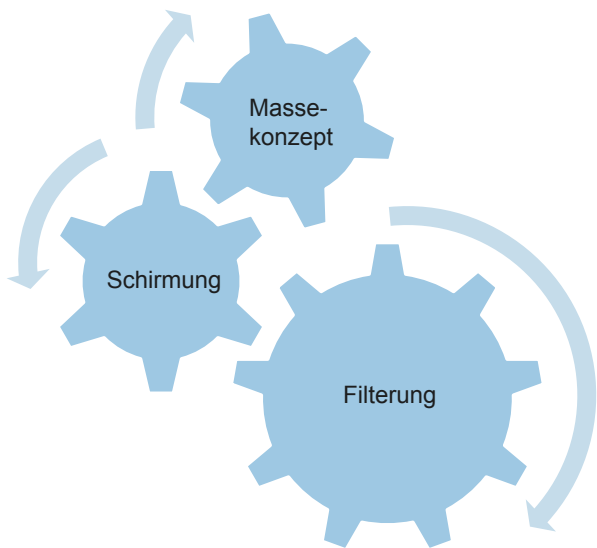
Zur Vermeidung von Störungen dient eine EMV-gerechte Auslegung von Systemen. Zu den bekannten Maßnahmen zählen die richtige Auswahl von Materialien und Bauteilen, die Schirmung von Gehäusen und Leitungen, die Filterung elektrischer Schaltungen sowie interner und externer Leitungen, das Verdrillen, die Verwendung symmetrischer Signale und eine EMV-gerechte Leitungsführung, bspw. die räumliche Trennung von Hoch-Volt- und Signalleitungen oder die Überschneidung solcher Leitungen nur im rechten Winkel. Häufig lassen sich Störungen durch eine geeignete Massegebung und die Vermeidung weitläufiger Störstromschleifen auf einer Platine vermeiden. Weiterhin sollten in EMV-kritischen Systemen Löt-pads für spätere Filterbauteile vorgehalten werden. Wirksam ist je nach Störsituation entweder das Unterbrechen oder das

Zusammenschließen elektrischer Massen, etwa zur Vermeidung der o. g. galvanischen Kopplungen. Analoge Größen sind störanfälliger als digitale, daher sollte zur Reduzierung analoger Störeinflüsse eine Digitalisierung dieser Größen durch hohe Integration an der Quelle, bspw. direkt am Sensor, vorgenommen werden. Durch die Auswahl geeigneter und reduzierter Taktfrequenzen lassen sich Störeinflüsse auf nahe liegende bandbegrenzte Funkempfänger vermeiden, da die Taktfrequenz quadratisch in die Störaussendung eingeht (Abb. 5.28).

Zusätzlich sollen die EMV-Maßnahmen immer an oder in der Quelle beginnen. Sie müssen in einem frühen Stadium der Entwicklung implementiert werden, also ein Hineinentwickeln und kein Hineinprüfen, was zu einem späten Zeitpunkt einen hohen Zeit- und Kostenaufwand bedeutet. Tab. 5.5 zeigt die frühzeitige Festlegung EMV-relevanter Spannungswerte zur Zeit der Lastenhefterstellung von Hoch-Volt-Komponenten im Elektrofahrzeug. Auch die Definition der notwendigen Transferimpedanz/Kopplungsimpedanz bzw. Schirmdämpfung von Hoch-Volt-DC- und AC-Leitungen (Schirmungsart und Schirmaufbau) muss frühzeitig im Projekt definiert werden.

Nach DIN EN 50289-1-6 ist die Transferimpedanz der Quotient der Längsspannung, die in den äußeren Kreis (Umgebung) induziert wird, zum Strom im inneren Kreis (Kabel)

Abb. 5.28 Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV



Tab. 5.5 Spannungspegel für Hoch-Volt-Komponenten im Fahrzeug

Parameter	Einheit	Spannung < 200 V
Spannungsdynamik erzeugt durch eine HV-Komponente	V/ms	+/-20
Anliegende Spannungsdynamik	V/ms	+/-25
Maximale Spannungswelligkeit bei verbundener HV-Batterie	V pk	+/-10
Spannungswelligkeit bei getrennter HV-Batterie	V pk	+/-15

oder umgekehrt, bezogen auf die Längeneinheit. Weitere Festlegungen sind die Definitionen des Signalspannungsbereichs, des Signalstroms, der Kurzzeitunterbrechungen, der Schwellen für digitale Eingänge, der Eingangsbandbreite, möglicher eingekoppelter Störungen am Eingang (HF, Transiente, ESD), möglicher Kurzschlüsse nach GND/Plus-Potenzial, von Bauteiltoleranzen sowie Temperaturltoleranzen. Daher ist auf den Einsatz von Schirmleitungen mit niedriger Transferimpedanz und hoher Schirmdämpfung zu achten. Außerdem sollte durchgängig vom Chip über die Komponenten und Systeme bis zum Gesamtfahrzeug auf die Anwendung von ISO/CISPR- und IEC-Normen sowie EMV-Untersuchungen auf Systemebene zurückgegriffen werden. Bei Fahrzeugmessungen werden von der Gesetzgebung bis zu 100 V/m verträgliche Mindest-Störfeldstärken vorgeschrieben, wobei viele OEM bis zum 6-Fachen dieses Wertes ihre Fahrzeuge prüfen, was Werten aus der Flugzeugindustrie entspricht.

Auch wenn die technologische Entwicklung und hohe Stückzahlen für EMV-Maßnahmen, bspw. Filter für die Antriebselektronik, weitere Produktivitätssteigerungen und damit geringere Kosten bedeuten, bleiben Maßnahmen zur Einhaltung der EMV-Anforderungen ein beträchtlicher Mehraufwand bei der Entwicklung leistungselektronischer Systeme. Dieser Mehraufwand ist notwendig und darf keineswegs nur als leicht nachzurüstende Kosmetik verstanden werden. Bei Geräten mit nennenswerten Stückzahlen ist es erforderlich, die EMV schon zu Beginn einer Systementwicklung zu berücksichtigen, um den Aufwand insgesamt zu minimieren. Außerdem ist zu beachten, dass durch eine zu hohe Variantenvielfalt die zu prüfenden Kombinationen in die Millionen gehen können, was nicht mehr zu beherrschen ist. Ob man nun EMV-Experten zusätzlich zu Systementwicklern in den Prozess einbezieht oder die Systementwickler zum Thema kostengünstiger EMV-Entwurf schult – Mehrkosten von 2–5 % des Systempreises, wie sie im Zusammenhang mit der Einführung des EMV-Gesetzes häufig geäußert wurden, dürften für die Antriebstechnik eine Wunschvorstellung bleiben.

5.5 Leichtbau

Leichtbau in konventionellen Fahrzeugen ist vornehmlich durch die beiden zentralen Aspekte Senkung des Energieverbrauchs und Steigerung der Fahrdynamik motiviert. Die Senkung des Energieverbrauchs hat sowohl für den Kunden (geringere Betriebskosten) als auch für den Fahrzeughersteller (geringerer CO₂-Flottenausstoß) einen wirtschaftlichen Vorteil, während sich die Steigerung der Fahrdynamik nicht unmittelbar wirtschaftlich bewerten lässt. Ersteres gewinnt sowohl für den Kunden als auch den Hersteller an Bedeutung, da mit der sinkenden Fahrzeugmasse und der damit möglichen Reduktion des Energiespeichers die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs insgesamt stark verbessert werden kann.

Der signifikante Anstieg der Fahrzeugmasse bei konventionellen Fahrzeugen, bedingt durch gewachsene Anforderungen an die Komfort- und Interieurfunktionen (+ 37 % Zuwachs von Golf I zu Golf V), die Qualität (+ 8 %) und die Sicherheit (+ 30 %) des Fahrzeugs, sowie gestiegene legislative Anforderungen (+ 25 %) haben dazu geführt, dass

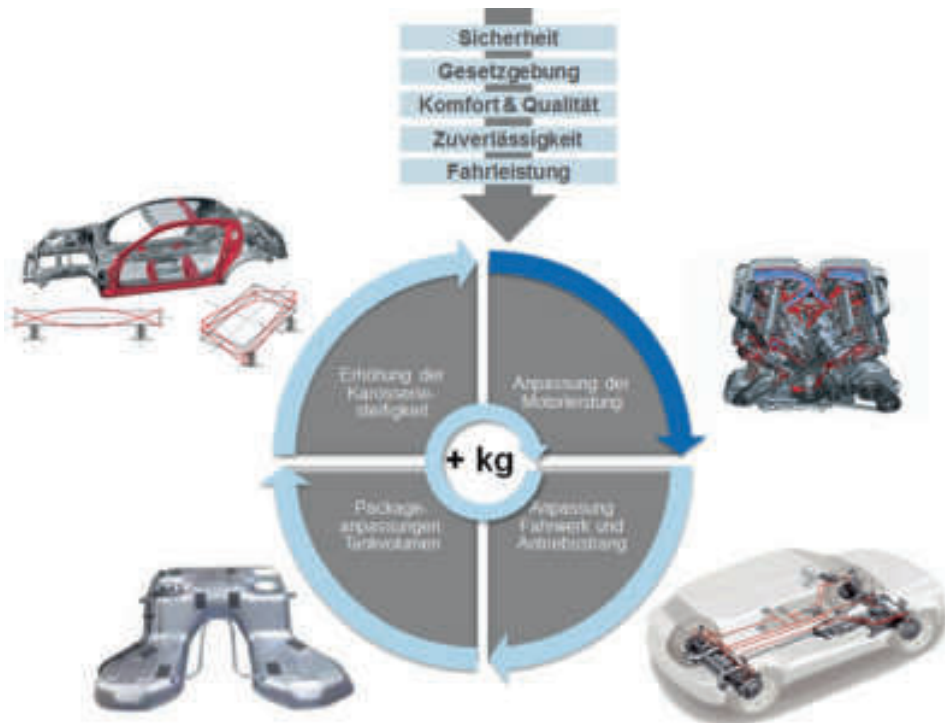


Abb. 5.29 Gewichtsspirale konventioneller Fahrzeuge (Eckstein 2010)

das Thema Leichtbau in den letzten Jahren wichtiger wurde (Goede et al. 2005). Die Gewichtsspirale in Abb. 5.29 verdeutlicht, dass durch die genannten Treiber eine Zunahme der Fahrzeugmasse induziert wird. Zur Kompensation der Zusatzmassen sind Leichtbaumaßnahmen erforderlich.

Umfangreiche Leichtbaumaßnahmen wurden in Fahrzeugen des Oberklasse-Segments deutlich früher eingesetzt als in preiswerteren Fahrzeugen, da dort der Mehrpreis, der mit dem erhöhten Einsatz von Leichtbaumaßnahmen einhergeht, durch den höheren Verkaufspreis kompensiert werden kann. Dass sich diese Leichtbaumaßnahmen mittlerweile bis in das Kompakt-Segment durchsetzen, zeigt Abb. 5.30 am Beispiel der Leergewichtsentwicklung eines Volkswagen Polo, Golf und Passat über die einzelnen Baureihen. Im Mittelklasse-Segment ist bereits eine Stagnation bzw. Verringerung der Fahrzeugmasse mit der Einführung des Passat B5 im Jahr 1996 zu erkennen, wohingegen dies im Kompakt-Segment erst mit dem Golf VI vollzogen wird. Im Kleinwagen-Segment (bspw. Volkswagen Polo) sind bisher noch keine signifikanten Leichtbaumaßnahmen in der Entwicklung der Fahrzeugmasse zur Kompensation des steigenden Mehrgewichts über die Baureihen erkennbar.

Leichtbaumaßnahmen werden besonders im Bereich des Antriebs, des Exterieurs und der Karosserie angewandt, da diese Baugruppen einen Großteil der Gesamtfahrzeugmasse ausmachen. Abb. 5.31 stellt bisherige und potenzielle zukünftige Leichtbaumaßnahmen in

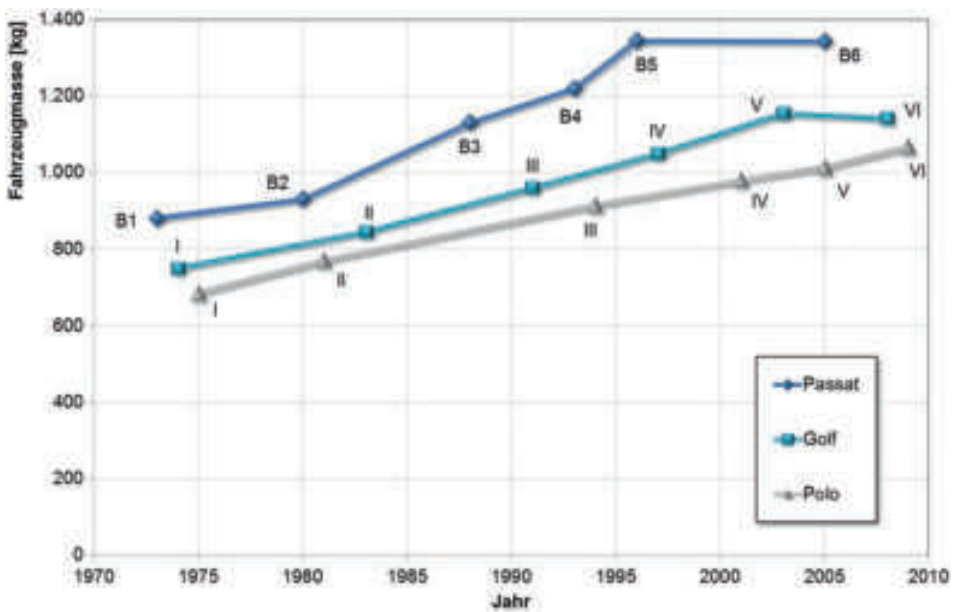


Abb. 5.30 Entwicklung der Fahrzeugmasse verschiedener Fahrzeugsegmente (Eckstein 2010)

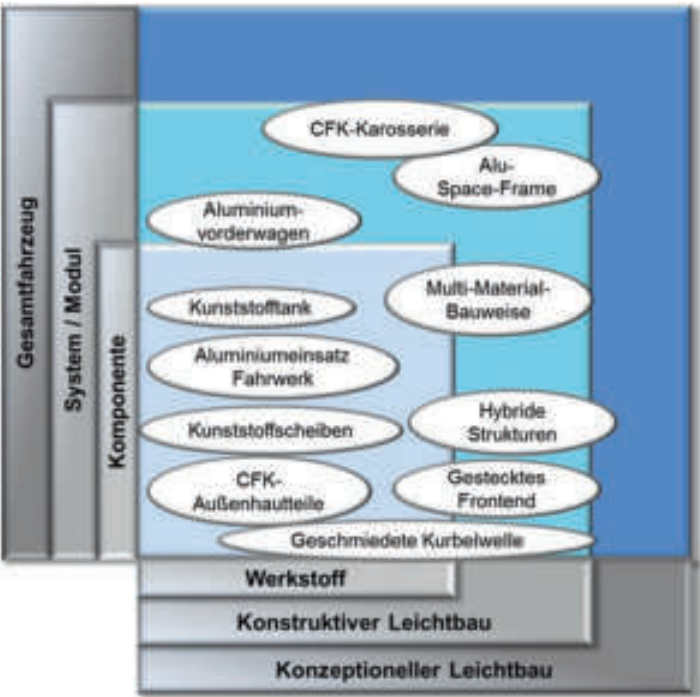


Abb. 5.31 Leichtbaumatrix für konventionelle Fahrzeuge (Eckstein 2010)

konventionellen Fahrzeugen als Matrix dar. Dabei wird einerseits zwischen den prinzipiellen Ebenen werkstofflicher, konstruktiver und konzeptioneller Leichtbau unterschieden, andererseits zwischen den Fahrzeugintegrationsebenen Komponente, System bzw. Modul und Gesamtfahrzeug.

Der Haupthinderungsgrund für den Einsatz weitreichender Leichtbaumaßnahmen sind deren Mehrkosten. Die derzeit akzeptierten Mehrkosten je eingespartem Kilogramm Fahrzeugmasse durch Leichtbaumaßnahmen liegen je nach Fahrzeugsegment bei etwa 5 Euro (Deinzer 2009). Aufgrund der Begrenzung des CO₂-Flottenausstoßes sowie steigender Kraftstoffpreise werden diese akzeptierten Leichtbaukosten zukünftig weiter steigen.

Aktuelle Forschungsergebnisse zum Thema Leichtbau benennen das Potenzial zukünftiger Gewichtseinsparungen. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf das Projekt „SuperLight-Car“ (SLC) hingewiesen. Am Beispiel eines Golf V wurde ein Leichtbaupotenzial von 37 % gegenüber der Body-in-White-Masse (BIW) nachgewiesen. Die dadurch verursachten Leichtbaumehrkosten von 112 % gegenüber der Basis sind jedoch nicht wirtschaftlich darstellbar. Analog zum Gewichtsreduktionspotenzial in der Karosserie gibt Lotus in einer Studie das Potenzial für das Gesamtfahrzeug (ohne Antriebsstrang) ebenfalls mit bis zu 38 % an (NN 2010a).

Um den Zusammenhang zwischen Leichtbaumaßnahmen und -kosten für das Elektrofahrzeug beschreiben zu können, wird der Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse analysiert. Der Energieverbrauch eines Elektrofahrzeugs ist bei der Auslegung des Batteriesystems eine der entscheidenden Größen und bestimmt maßgeblich die Kapazität und die Kosten der zu installierenden Batterie. Er resultiert aus den Fahrwiderständen in Form von Roll-, Luft-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand sowie der Bereitstellung von elektrischer Energie für die Nebenverbraucher, welche nicht am Antrieb des Fahrzeugs beteiligt sind. In Abhängigkeit von der Güte der Energiewandlung durch das Antriebsmodul und die Batterie folgt aus diesem Energiebedarf der Energieverbrauch des Fahrzeugs.

Als Basis für eine Untersuchung wird ein batterie-elektrisches Fahrzeug aus dem Kleinwagensegment mit einer Fahrzeugmasse von 1100 kg ausgewählt und in den Simulationsrechnungen bis zu einer Minimalfahrzeugmasse von 500 kg und einer Maximalmasse von 1700 kg variiert. Unter Berücksichtigung der geforderten Fahrleistungen (Beschleunigungen und Höchstgeschwindigkeit) wird die Leistung des elektrischen Antriebsstrangs der Fahrzeugmasse angepasst.

Der Energieverbrauch ist im Bereich von 700–1700 kg in den Fahrzyklen NEDC und dem Hyzem-Urban-Zyklus nahezu linear abhängig von der Fahrzeugmasse (s. Abb. 5.32). Die Steigung und der Achsenabschnitt dieser Funktionen sind dabei abhängig vom gewählten Zyklus und der Auslegung der Antriebskomponenten. Der y-Achsenabschnitt dieser Funktion bei einer virtuellen Fahrzeugmasse von 0 kg beschreibt den Grundverbrauch und ist abhängig vom Luftwiderstand des Fahrzeugs sowie von den Verlusten des Antriebsstrangs und der elektrischen Verbraucher. Mit Hilfe der Steigung und des y-Achsenabschnitts dieser Funktionen können Batteriekapazität und -masse für das Fahrzeug entsprechend der Auslegungsreichweite und unter Annahme verschiedener Parameter für das Batteriesystem berechnet werden.

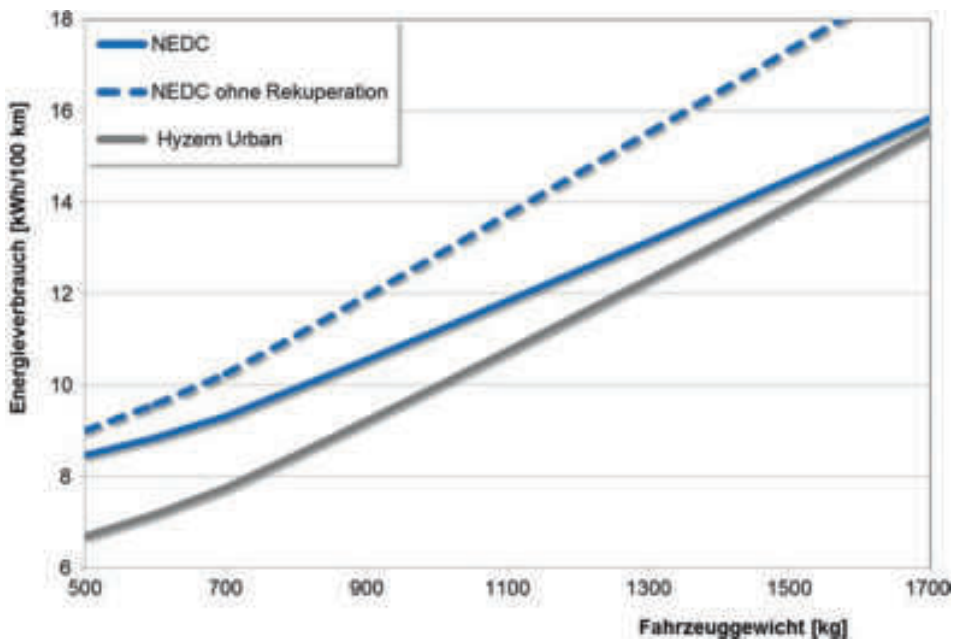


Abb. 5.32 Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Energieverbrauch

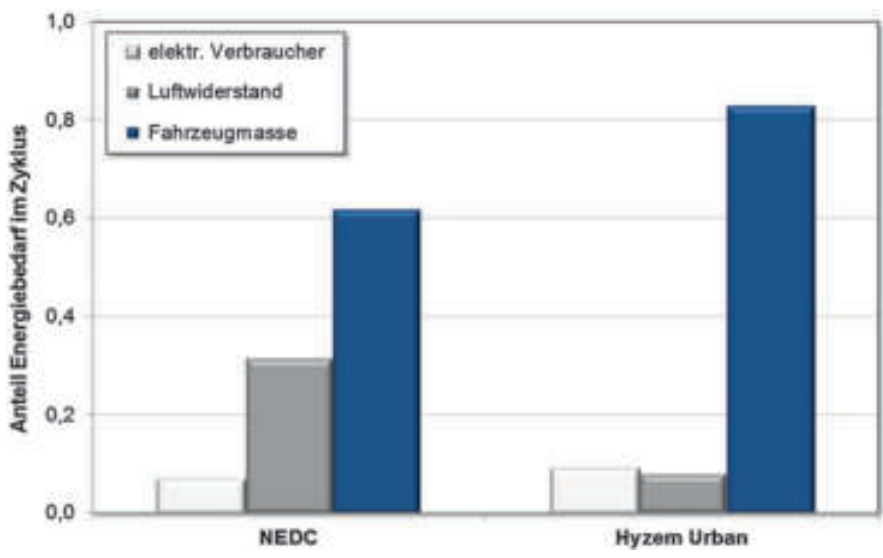


Abb. 5.33 Anteil der Fahrzeugmasse am Energieverbrauch (Eckstein 2010)

Die Analyse ergibt, dass die erforderliche Batteriemasse linear abhängig von der Fahrzeugmasse ist. Somit beeinflusst die Fahrzeugmasse neben der Auslegungsreichweite und den Batterieparametern die Dimensionierung der Batterie maßgeblich (s. Abb. 5.33).

Dieser funktionale Zusammenhang ermöglicht im nächsten Schritt die Quantifizierung der Kosteneinsparpotenziale durch Leichtbau in Abhängigkeit vom betrachteten Zyklus, der Auslegungsreichweite und der nutzbaren spezifischen Energiedichte des Batteriesystems.

Der signifikante Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Energieverbrauch und die elektrische Reichweite sowie die hohen Batteriesystemkosten lassen ein großes Potenzial von Leichtbaumaßnahmen im Elektrofahrzeug vermuten. Um dieses Potenzial zu evaluieren, bedarf es der Quantifizierung der eingesparten Batteriesystemkosten durch Leichtbaumaßnahmen je reduziertem Kilogramm Fahrzeugmasse (s. Abb. 5.34).

Bei heutigen Batteriesystemkosten von ca. 1000 Euro/kWh (NN 2010b) und ansonsten konstanten Herstellkosten für das Gesamtfahrzeug sind je nach Auslegungsreichweite im NEDC Kosteneinsparungen von 8–18 Euro je eingespartem Kilogramm Fahrzeugmasse zu erwarten. Dies beruht auf einer dann möglichen Reduktion der Batteriesystemgröße. Für eine mittelfristige Entwicklung der spezifischen Batteriesystemkosten auf ca. 600 Euro/kWh (Sauer und Lunz 2010) ergeben sich ca. 10 Euro Kosteneinsparung pro reduziertem Kilogramm Fahrzeugmasse. Bei zukünftig zu erwartenden spezifischen Batteriesystemkosten von 200–300 Euro/kWh (Sauer und Lunz 2010) reduziert sich dieser Betrag auf ca. 2–5 Euro/kg.

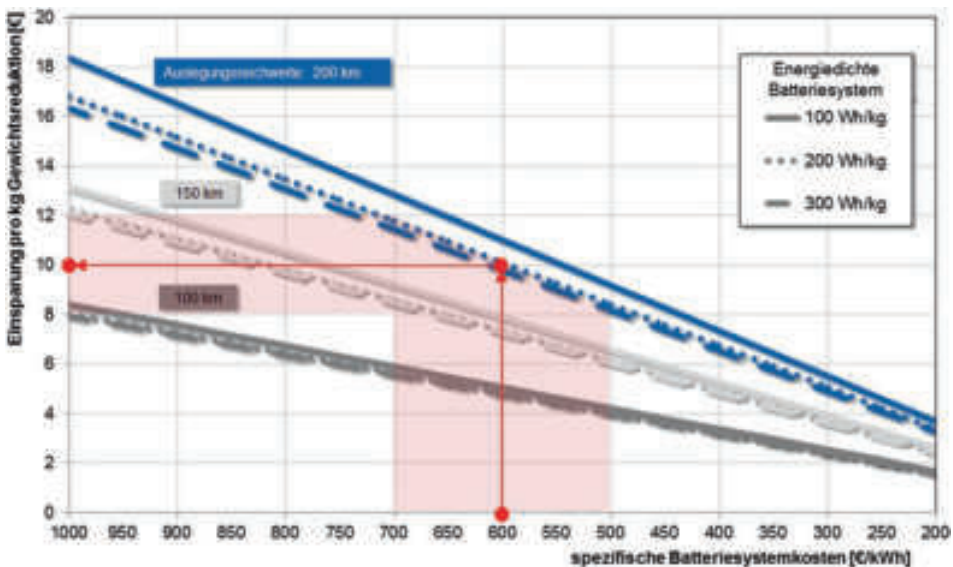


Abb. 5.34 Quantifizierung von wirtschaftlichen Leichtbaumaßnahmen durch Einsparungen im Batteriesystem (Eckstein 2010)

Im Gegensatz zum konventionellen Fahrzeug, bei dem Kosten für Leichtbau investiert und somit akzeptiert werden, zeigen die ermittelten Werte, dass im Elektrofahrzeug Leichtbaumaßnahmen im Bereich zwischen 2 und 18 Euro/kg kostenneutral dargestellt werden können. Der Einsatz von Technologien und Materialien, die im konventionellen Fahrzeugbau als zu kostenintensiv eingestuft werden, kann im Elektrofahrzeug in Abhängigkeit vom Einsparpotenzial durchaus sinnvoll sein. Dieser Wandel in der Bedeutung von Leichtbaumaßnahmen für Elektrofahrzeuge macht eine neue Bewertung der anzuwendenden Materialien und Technologien vor dem Hintergrund der Fahrzeuggesamtkosten und der Reichweite notwendig.

Zur Identifikation der potenzialträchtigsten Baugruppen und Systeme für diese Leichtbaumaßnahmen bedarf es einer gezielten Betrachtung der sich aufgrund der „neuen“ elektrofahrzeugspezifischen Komponenteneinstellenden Verteilung der Fahrzeugsystemmassen. Abb. 5.35 skizziert hierzu den Vergleich eines konventionellen Fahrzeugs des Kleinwagen-Segments mit einem Purpose-Design-Elektrofahrzeug derselben Fahrzeugklasse mit 220 km Reichweite und einer spezifischen Energiedichte des elektrochemischen Speichers von 130 Wh/kg. Deutlich zu erkennen ist der gestiegene Anteil des Antriebsstrangs an der Fahrzeugmasse, hierbei besonders der Traktionsbatterie, gegenüber den anderen Fahrzeugsystemen.

Das Verhältnis der anderen Fahrzeugsysteme zueinander ändert sich im Elektrofahrzeug nicht signifikant gegenüber der bisherigen Verteilung. Daher liegt es nahe, in diesen Fahrzeugsystemen die bereits erarbeiteten Leichtbaumaßnahmen aus konventionellen

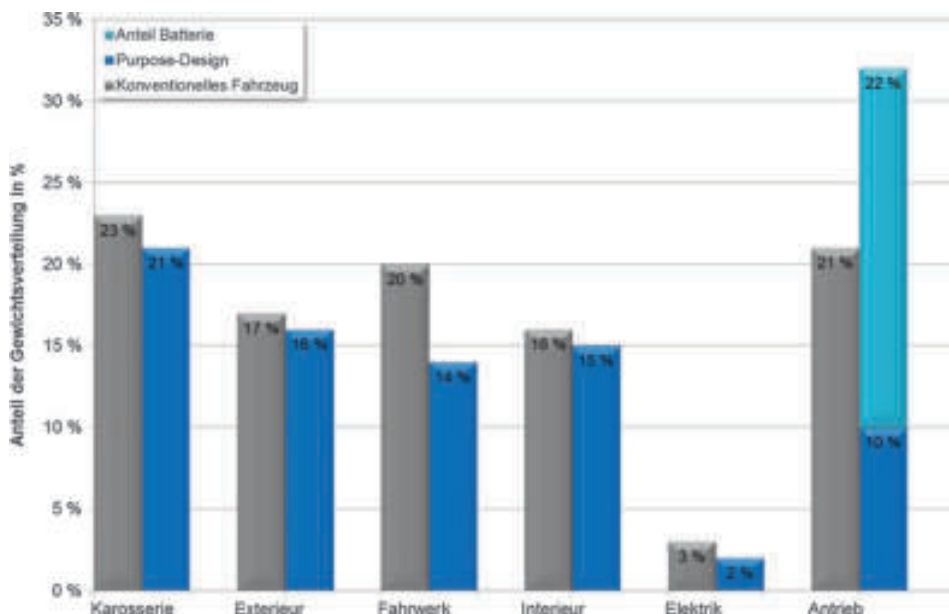


Abb. 5.35 Massenverteilung Vergleich Elektrofahrzeug und konventionelles Fahrzeug nach Fahrzeugsystemen (Eckstein 2010)

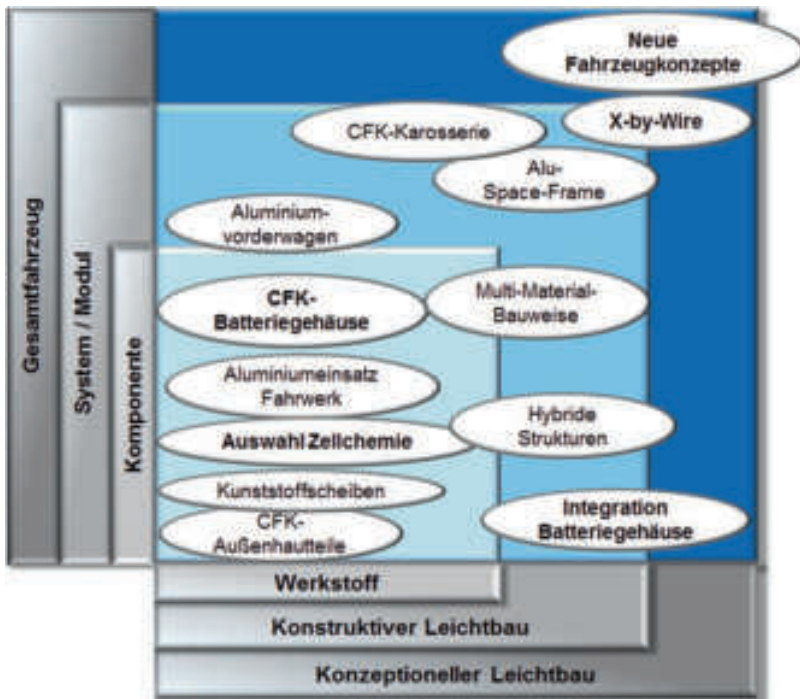


Abb. 5.36 Leichtbaumatrix von Elektrofahrzeugen (Eckstein 2010)

Fahrzeugsystemen (Karosserie, Exterieur und Fahrwerk), deren bisherige Umsetzung an den Leichtbaumehrkosten scheiterte, im Elektrofahrzeug anzuwenden. Wichtig ist hierbei die wahrnehmungsneutrale Umsetzung der Maßnahmen ohne Funktionsverlust des Systems, um eine hohe Kundenakzeptanz zu gewährleisten. Abb. 5.36 enthält die Leichtbaumatrix für Elektrofahrzeuge mit Beispielen von neuen und bereits bekannten Leichtbaumaßnahmen, die potenziell zum Einsatz in Elektrofahrzeugen kommen können.

Nachdem bereits heute bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen regelmäßig werkstofflicher Leichtbau auf Komponentenebene betrieben wird (bspw. Türen und Klappen aus Kunststoff oder Aluminium), gilt es im nächsten Schritt, die spezifischen Vorzüge von Leichtbauwerkstoffen konstruktiv auf System- bzw. Modulebene zu erschließen. Ein naher liegender Ansatz ist die werkstoffgerechte, ein weiterer die Integration mehrerer Funktionen in ein Bauteil (Funktionsintegration). Als Beispiel sei eine Motorhaube aus einem dreidimensional geflochtenen faserverstärkten Kunststoff angeführt, die zusätzliche Funktionen wie Fußgängerschutz oder Schall- und Wärmedämmung übernehmen kann. Weiteres Potenzial kann realisiert werden, indem Leichtbaumaßnahmen nicht nur systemspezifisch, sondern auch systemübergreifend (bspw.: X-by-Wire, Integration Batteriegehäuse und Karosseriestruktur) umgesetzt werden.

Eine besondere Rolle spielt wiederum das Batteriesystem. Es bietet auf Zell- und Systemebene ein großes Leichtbaupotenzial. Auf Zellebene kann die Energiedichte durch

Auswahl und Kombination der Materialien für Kathode, Anode, Separator und Elektrolyt erhöht werden und zur Reduzierung der Batteriemasse beitragen. Durch die Weiterentwicklung bekannter Materialien und die Verwendung neuer Zellen erscheinen Energiedichten von 300 Wh/kg in Zukunft als realistisch (Sauer und Lunz 2010), wodurch die Masse der Zellen bei konstanter Auslegungsreichweite um den Faktor 1,5–3 reduziert werden könnte. Im Vergleich zu einem heutigen System mit einer Energiedichte auf Zellebene von maximal 200 Wh/kg würde sich die Masse der Zellen um ca. 110 kg auf 190 kg reduzieren. (Schmitt 2011; Eckstein et al. 2010)

Zu einem vollständigen Batteriesystem für den Einsatz im Fahrzeug zählt neben den Batteriezellen auch die Peripherie, bestehend aus Zell- und Modulverbinder, Kühlsystem, Elektronik und Gehäuse. Sie ermöglicht erst den sicheren und kontrollierten Betrieb, erhöht andererseits aber die Masse des Systems. Eine Übersicht der Massenanteile von Zelle und Peripherie verschiedener Batteriesysteme aktueller Elektrofahrzeuge (Serien- und Prototypenfahrzeuge) liefert Abb. 5.37.

Aus der Abbildung geht hervor, dass 25–40 % der Gesamtmasse des Batteriesystems der Peripherie zugesprochen werden können. Die großen Unterschiede resultieren hauptsächlich aus der Auslegung, Gestaltung und Komplexität des Kühl- und Heizkonzeptes der verschiedenen Systeme. Neben einer bedarfsgerechten und gewichtsoptimierten Auslegung des Kühlsystems stellt die Reduzierung der Gehäusemasse, bspw. durch die Verwendung von CFK-Werkstoffen für den Aufbau des Gehäuses oder die Integration des Batteriegehäuses in die Karosseriestruktur des Fahrzeugs, eine weitere mögliche Maßnahme dar, um die Peripherie leicht ausführen zu können. (Eckstein et al. 2010)

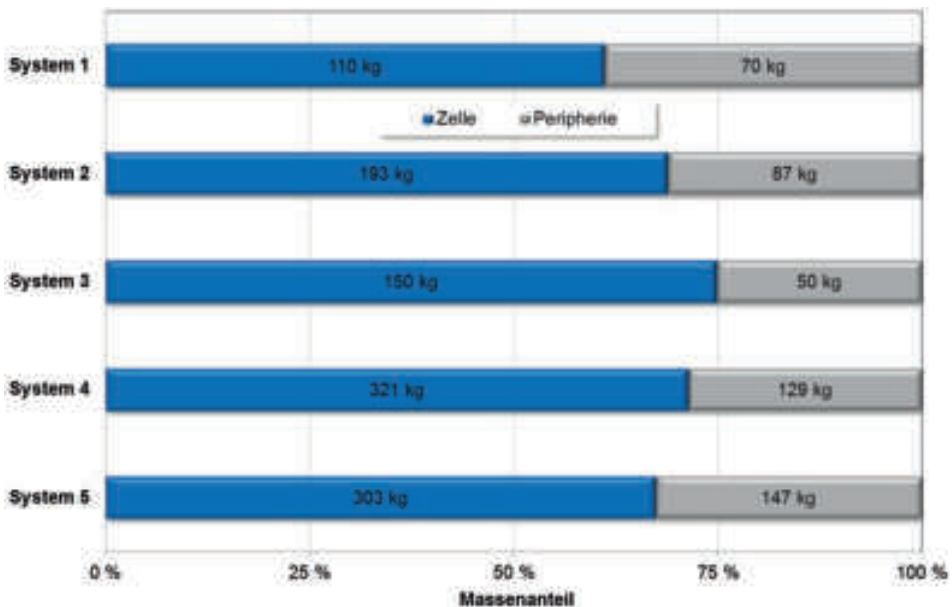


Abb. 5.37 Vergleich Massenanteile Zelle und Peripherie von Batteriesystemen (Eckstein 2010)

Schließlich gilt es, auf Gesamtfahrzeugebene konzeptionellen Leichtbau zu betreiben. Nur so kann eine Fahrzeugmasse deutlich unterhalb der 1000-kg-Marke realisiert werden, ohne bei der Fahrzeugsicherheit Zugeständnisse zu machen. Dazu müssen etablierte Systemgrenzen und Auslegungskriterien hinterfragt werden. Der erste Schritt ist eine Anforderungsfokussierung, bspw.: Was ist eine sinnvolle Auslegungsgeschwindigkeit, welche maximale Antriebsleistung ist zu berücksichtigen? In einem weiteren Schritt gilt es zu analysieren, wie die definierten Zieleigenschaften durch das Zusammenwirken mehrerer Systeme effizient und kostengünstig dargestellt werden können. Für die Fahrzeugsicherheit bedeutet dies bspw., dass aktive und passive Sicherheit gemeinsam betrachtet und optimiert werden müssen, denn durch die Vernetzung von Fahrwerksregelsystemen, Fahrerassistenzsystemen und Systemen der passiven Sicherheit können besonders kritische Situationen und Lastfälle von vornherein weitestgehend vermieden werden. Abb. 5.38 fasst die einzelnen Fahrzeugsysteme mit großem Leichtbaupotenzial noch einmal kompakt zusammen.

Die aufgezeigten Einsparpotenziale für Energieverbrauch und Kosten durch Leichtbau bei Elektrofahrzeugen ermöglichen gegenüber dem konventionellen Fahrzeug den Einsatz von bisher durch die akzeptierten Leichtbaumehrkosten ausgeschlossenen Maßnahmen in den Anwendungsbereichen Karosserie, Exterieur und Fahrwerk auf System- bzw. Modulebene. Außerdem kommt der Reduktion der Batteriemasse auf Zell- und Systemebene eine besondere Bedeutung zu. Durch den quantifizierten kostenneutralen Einsatz von Leichtbau ist eine signifikante Reduktion der Elektrofahrzeugmasse möglich, die eine Leichtbauspирale induziert (s. Abb. 5.39). Im Vergleich zur Gewichtsspirale verstärken sich die Leichtbaumaßnahmen und führen zu einer weiteren Reduktion der Fahrzeugmasse.

Durch die Einführung von weiterführenden, im Elektrofahrzeug kostenneutral darstellbaren Leichtbaumaßnahmen erscheint der zukünftige Einsatz dieser Maßnahmen auch im

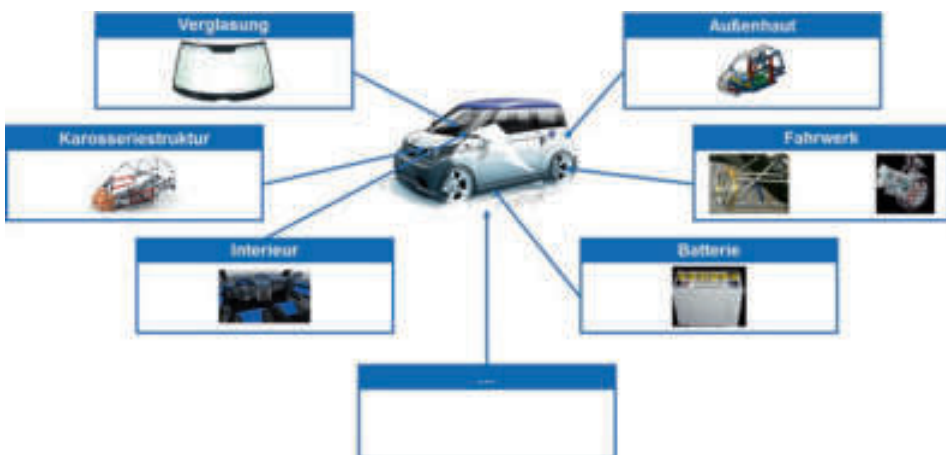


Abb. 5.38 Potenziale Leichtbau im Elektrofahrzeug

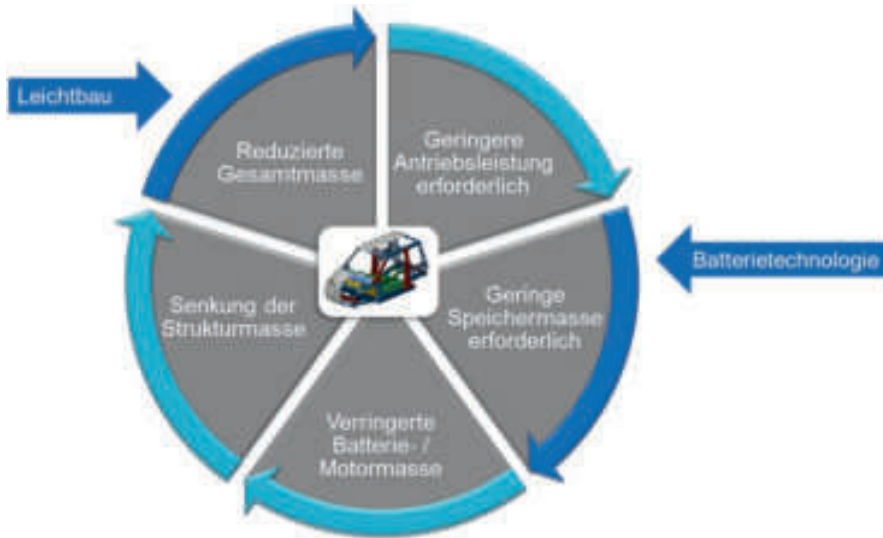


Abb. 5.39 Leichtbauspирale für Elektrofahrzeuge

konventionellen Fahrzeug möglich und somit nicht nur ein Anhalten der Gewichtsspirale, sondern eine Umkehr hin zur Leichtbauspирale. Zur Ausschöpfung des vollen Potenzials von Leichtbau sind jedoch noch stärker konzeptionelle Maßnahmen auf der Gesamtfahrzeugebene notwendig. Dies ist nur durch völlig neue Fahrzeugkonzepte erreichbar, die den Zielkonflikt zwischen Effizienz, Sicherheit und Fahrerlebnis auf andere Weise lösen, als es bislang bei konventionellen Fahrzeugen der Fall war.

5.6 Industrialisierung

Die Industrialisierung der Elektromobilproduktion beschreibt den Weg von der Produktidee bis zur Serienproduktion. Sie umfasst die Phasen der Produkt- und Prozessentwicklung und des Anlaufmanagements unter ständiger Berücksichtigung aktueller Normen und Standards.

Die Produkt- und Prozessentwicklung beginnt mit der ersten Produktidee und deren Planung und endet mit dem Beginn der Serienproduktion. Sie strukturiert die einzelnen Phasen der Entstehung eines neuen Produktes.

Die Phase des Anlaufmanagements startet erst mit der Fertigstellung eines Produkt-Prototyps und beschäftigt sich mit den Herausforderungen des Serienanlaufs auf dem Weg zur Serienproduktion.

Normen und Standards begleiten den gesamten Entwicklungs- sowie Anlaufprozess und dienen als Regelwerk für sicherheitstechnische Festlegungen und Prüfbedingungen.

5.6.1 Normen und Standards

Neben der Straßenfahrzeugtechnik, der Energieversorgung und der erforderlichen Informations- und Kommunikationstechnologie ist das Einhalten von Normen und Standards eine zentrale Voraussetzung für den Erfolg der Elektromobilität. Insbesondere im Bereich der Normung und Standardisierung ist eine enge Zusammenarbeit der bisher weitgehend getrennt betrachteten Domänen Automobiltechnik, Elektro- und Energietechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik notwendig (Nationale Plattform für Elektromobilität 2014). Außerdem dienen Normen und Standards dazu, Rahmenbedingungen festzulegen, die den Herstellern ein gewisses Maß an Investitionssicherheit bieten (Nationale Plattform für Elektromobilität 2014).

Um vom Kunden akzeptiert zu werden, muss ein Elektrofahrzeug die gleiche Sicherheit und Mobilität wie ein konventionelles Fahrzeug bieten – und das zu einem angemessenen Preis. Daher werden im Folgenden neben der Zulassung die Themen Sicherheit, Ladeinfrastruktur, individuelle Mobilität und Systemkomponenten anhand der derzeit wichtigsten Normen und Standards behandelt. Eine aktuelle Übersicht aller relevanten Normen und Standards zur Elektromobilität liefert die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität.

5.6.1.1 Zulassung

Die Fahrzeughomologation ist ein überstaatliches System für die Zulassung von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen (vgl. Abschn. 5.1). Sie basiert auf dem „Übereinkommen von 1958“, das im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN ECE) geschlossen wurde. Die Vertragsparteien des ECE-Abkommens sind dazu berechtigt, Vorschriften für die Genehmigung von Fahrzeugen, Ausrüstungsgegenständen und Teilen von Kraftfahrzeugen zu erlassen (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung). Gleichmaßen gibt es die Verpflichtung, die Typgenehmigungen aller Vertragsparteien anzuerkennen (StVZO § 21a). Die technischen Vorschriften beziehen sich auf die Themen aktive und passive Sicherheit, Umweltschutz und Kraftstoffverbrauch von Radfahrzeugen (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010). Nach dem Beitritt der Europäischen Gemeinschaft 1998 beteiligte sich diese aktiv an den Verhandlungen zu einem zweiten internationalen Übereinkommen (Beschluss 97/836/EG). Das sog. „Parallelübereinkommen“ unterscheidet sich vom Übereinkommen von 1958 darin, dass es keine gegenseitige Anerkennung von Genehmigungen vorschreibt (Beschluss 2000/125/EG). Es bietet Ländern die Möglichkeit, sich an der Ausarbeitung globaler technischer Regelungen zu beteiligen, ohne die Verpflichtungen der gegenseitigen Anerkennung zu übernehmen (Zusammenfassungen der EU-Gesetzgebung).

Elektrofahrzeuge müssen weitestgehend die gleichen Vorschriften wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erfüllen. Außerdem bestehen zusätzliche Vorschriften, die nur für Kraftfahrzeuge mit elektrischem Antrieb gelten. Dafür wurden einige ECE-Regelungen,

wie bspw. die [ECE-R 85](#) zur Ermittlung der Motorleistung oder die [ECE-R 100](#) für die Sicherheitsbedingungen der Traktionsbatterie, überarbeitet bzw. weiterentwickelt (Nationale Plattform für Elektromobilität [2010](#)).

5.6.1.2 Produkt- und Betriebssicherheit

Die Produkt- und Betriebssicherheit ist ein wichtiges Thema in der Elektromobilproduktion. Vor allem hier müssen allgemein akzeptierte Regeln und Prüfverfahren die Sicherheit für den Anwender gewährleisten. Vorrangig behandelt werden die Themen elektrische Sicherheit, im Hinblick auf die Herausforderung durch die Hoch-Volt-Technik und die funktionale Sicherheit (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#)).

5.6.1.3 Elektrische Sicherheit

In § 62 der [StVZO](#) heißt es: „Elektrische Einrichtungen von elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen müssen so beschaffen sein, dass bei verkehrsüblichem Betrieb der Fahrzeuge durch elektrische Einwirkung weder Personen verletzt noch Sachen beschädigt werden können.“

Deshalb wird in den meisten Elektrofahrzeugen zur Versorgung der Hoch-Volt-Verbraucher ein vollständig isoliertes Gleichspannungssystem (Hoch-Volt-System) installiert. Als Hoch-Volt bezeichnet man die Spannungsklasse B mit Spannungen größer 30 V AC bis einschließlich 1000 V AC bzw. größer 60 V DC bis einschließlich 1500 V DC. Ähnlich einem IT-Netz (frz. Isolé terre) zeichnet sich das Hoch-Volt-Netz durch seine erhöhte Ausfall- und Unfallsicherheit bei Fehlern der Isolation aus. Der Vorteil besteht darin, dass ein erster Isolationsfehler zwischen einem Leiter und dem Gehäuse bzw. der Karosserie keine schädlichen Auswirkungen hat, sodass das elektrische System des Fahrzeugs nicht abgeschaltet werden muss. Ein Isolationsüberwachungsgerät (ISO-Wächter) kontrolliert den Isolationszustand regelmäßig oder permanent und meldet dem Fahrer den Fehler, der umgehend behoben werden sollte, da ein Isolationsfehler des zweiten Leiters zu einem Kurzschluss führen würde. (Sagawe [2010](#))

Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag haben, wie eingangs erwähnt, oberste Priorität. Die [ISO 6469-3](#) – gültig für das fahrende und stehende Fahrzeug – soll den Schutz gegen direktes und indirektes Berühren des Elektrofahrzeugs gewährleisten (Hofheinz [2010](#)). Dazu gehören u. a. die Basisisolierung aller spannungsführenden Teile und der Potenzialausgleich von Karosserieteilen. Bei der Isolationskoordination sind außerdem die Mindestabmessungen für Luft- und Kriechstrecken zu beachten ([DIN IEC 60664](#)).

Für die Typprüfung ist die [ECE-R 100](#) bereits verbindlich vom Gesetzgeber vorgebeschrieben. Es sind allerdings noch nicht alle Sicherheitsmaßnahmen zur Hoch-Volt-Technik darin erfasst.

5.6.1.4 Funktionale Sicherheit

Derzeit ist die [ISO 26262](#) „Functional safety – Road vehicles“ für Straßenfahrzeuge nicht zulassungsrelevant. Der Automobilhersteller ist jedoch aus Produkthaftungsgründen dazu verpflichtet, die Sicherheitserwartungen zu erfüllen, die der Verbraucher nach dem Stand der

Technik erwarten darf. Dieser Stand wird durch Normen festgelegt. Seit Juli 2009 liegt die ISO 26262 als DIS (Draft International Standard – internationaler Standardentwurf) vor. Mitte 2011 wurde sie als internationaler Standard veröffentlicht und löste damit die [IEC 61508](#) für den Automobilbereich ab. Die IEC 61508 regelte die Entwicklung von sicherheitsrelevanten elektrischen, elektronischen und programmierbaren elektronischen Systemen. Jedoch war dieser Standard für den modernen Automobilbereich nicht spezifisch genug. Daher entwickelte man unter Beteiligung der Automobilindustrie die [ISO 26262](#).

Momentan beschränkt sich ihr Geltungsbereich auf Personenkraftwagen bis 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht. In der Automobilindustrie werden Systeme durch den Plattformgedanken auch in anderen Fahrzeugklassen verwendet. Beispielsweise unterscheiden sich Fensterheber in einem PKW kaum oder gar nicht von denen in einem Nutzfahrzeug. Somit ist es grundsätzlich sinnvoll, die ISO 26262 auf alle Klassen von Straßenfahrzeugen anzuwenden. (Sauler und Kriso [2009](#))

5.6.1.5 Systemkomponenten

Die Etablierung des Elektroautos wird sich innerhalb von Jahren vollziehen. Daraus resultieren flache Anlaufkurven in der Produktion. Um preislich dennoch konkurrenzfähig zu bleiben, ist eine unnötige Variantenvielfalt zu vermeiden und die Kompatibilität der Systemkomponenten in und außerhalb des Elektrofahrzeugs zu gewährleisten. (E-Mobility [2011](#))

5.6.1.6 Kabel und Steckverbindungen

Kabel- und Steckverbindungen in Elektrofahrzeugen bieten ein enormes Potenzial zur Kostenreduzierung durch Standardisierung. Neben der Erarbeitung kompatibler Schnittstellen untereinander werden hohe Ansprüche an die Qualität und Leistungsfähigkeit gelegt (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#)). Im Gegensatz zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wird die Energie im Elektrofahrzeug über Kupfer- und Aluminiumkabel transportiert. Neben den sicherheitsrelevanten Aspekten ist auch die elektromagnetische Verträglichkeit, insbesondere im Hinblick auf die sich stark weiterentwickelnden Kommunikationstechnologien und Unterhaltungselektronikanteile, zu beachten. In den Steckverbindungen werden zusätzlich zu den Hauptstromkontakten voreilende Signalkontakte integriert, um eine Unterbrechung der Signalleitung zu erkennen und ggfs. eine Bordnetztrennung durchzuführen. Dadurch können beim Trennen von stromführenden Steckverbindungen Lichtbögen vermieden werden, was nicht nur die Sicherheit, sondern auch die elektromagnetische Verträglichkeit erhöht (Hauck o. J.). Die Norm [ECE-R 10](#) zur „Elektromagnetischen Verträglichkeit“ umfasst in der mittlerweile 5. Revision konkrete Anforderungen an die Ladeeinrichtung, sowie an das Prüfverfahren im Ladebetrieb. (VDE [2012](#); UNECE [2014](#))

Die [ISO 6722](#) legt zwei Spannungsklassen (60 V und 600 V) für Leitungen im Elektrofahrzeug fest. Für die Zukunft werden noch höhere Spannungsklassen angestrebt, da diese kleinere Ströme und somit auch kleinere Kabelquerschnitte ermöglichen. Der Vorteil liegt in der Material- und Gewichtsersparnis.

Weiteres Potenzial zur Kostenreduzierung bietet die Erhaltung des 14-V-Bordnetzes. So können viele der heute effizient hergestellten Komponenten auch im Elektrofahrzeug verwendet werden. Das 42-V-Bordnetz wird für Nebenaggregate genutzt, die bspw. mechanisch arbeitende Systeme ersetzen können oder aufgrund ihrer Leistungsaufnahme wirtschaftlicher mit 42 V betrieben werden (42-V-Bordnetz – 42-V on-board power supply).

5.6.1.7 Ladeinfrastruktur

Die Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Smart Grid und die dazugehörige Infrastruktur sind ein weitreichendes Themenfeld. Schließlich geht es hierbei nicht nur um das Aufladen aus der Steckdose. Neben den verschiedenen Ladeorten spielen der Energiefluss und die Kommunikation eine wichtige Rolle. (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#))

Für ein langsames Laden des Privatwagens über Nacht in der heimischen Garage ist die Infrastruktur bereits gegeben. Dafür sind 220 V Haushaltsstrom ausreichend. Die Langstreckennutzung von Elektrofahrzeugen gestaltet sich jedoch ungleich schwieriger. Eine Möglichkeit ist das induktive Laden auf Parkplätzen. Allerdings ist der Aufbau eines flächendeckenden Netzes fraglich und teuer. Daher wird dem induktiven Laden in naher Zukunft weniger Bedeutung beigemessen, weshalb dafür zurzeit lediglich ein Normungsvorschlag vorliegt ([IEC 61980-1](#)). Eine weitere Möglichkeit wären Batteriewechselstationen. Auch hier gibt es viele technische Herausforderungen und noch keine Ansätze zur Standardisierung (Bille et al. [2011](#)). Auf dem Gebiet der Redox-Flow-Betankung besteht noch Forschungsbedarf, bevor es zu Normvorschlägen kommen kann (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#)).

Am weitesten vorangeschritten sind die Normungsaktivitäten zum kabelgebundenen Laden, vor allem bei den mechanischen und elektrischen Kennwerten sowie der Signalisierung (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#)). Hervorzuheben ist hier die bereits bestehende Norm [IEC 62196](#), die u. a. das leitungsgebundene Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom spezifiziert. Bei den Lademodi unterscheidet man zwischen Haushaltsstrom (bis 16 A) und Gerätestrom (bis 32 A) an der Standardsteckdose und Schnellladungen an speziellen Ladestationen bis zu 63 A.

Der dritte zentrale Aspekt der Ladeinfrastruktur ist die Kommunikation. Zum einen soll der Nutzer den Stromlieferanten selbst auswählen und zum anderen auch über den Lademodus bestimmen können. Vorstellbar ist, dass Personen ihren Wagen zu Hause und am Arbeitsplatz, der bspw. in einem anderen Netzgebiet liegt, laden. Solche Szenarien stellen die Entwicklung von Abrechnungssystemen vor große Herausforderungen. Des Weiteren soll eine Rückspeisung des Stroms möglich sein. Für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien können dadurch Phasen mit geringer Einspeisung überbrückt werden. Zu beachten sind hierbei u. a. die Norm [IEC 62351](#) der Normentwurf [ISO/IEC 15118](#). (Nationale Plattform für Elektromobilität [2014](#))

5.6.2 Produkt- und Prozessentwicklungsprozess

Der Prozess der Produkt- und Prozessentwicklung beschreibt, welche Aufgaben nötig sind, um von einem Entwurf zu einem marktreifen Serienprodukt zu gelangen, und definiert die Verantwortlichkeiten (Seidel 2005).

Ein herkömmliches Auto besteht aus 10.000–20.000 Teilen (Heß 2008). Die Entwicklung eines dieser Teile besteht aus einem ausgeprägten und funktionsübergreifenden Prozess.

Darum ist es unumgänglich, neue Produkte und Prozesse verzahnt und integriert zu entwickeln und frühzeitig Expertengruppen aus Marketing, Entwicklung, Forschung, Produktion, Finanzabteilung, Top-Management, Rechtsabteilung sowie Verkauf und Serviceabteilung einzubinden (Schäppi et al. 2005).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die einzelnen Phasen dieses Prozesses beschrieben. Es handelt sich um Planung, Konzeptentwicklung, Systemgestaltung, Detailgestaltung sowie Test und Optimierung. Der Produktionsstart ist der abschließende Teil und wird in Abschn. 5.6.3 erläutert (Laufenberg 1996) (Abb. 5.40).

5.6.2.1 Planung

Die erste Phase ist die Planung. Hier werden die grundsätzlichen Ziele der Neuentwicklungen und der grobe Projektablauf konzipiert. Die Ergebnisse werden in einem Businessplan festgehalten. Federführend ist in dieser ersten Phase das Marketing. Es müssen zunächst die Chancen für Elektromobile am Markt untersucht und die Marktsegmente definiert werden, um daraus die entsprechenden Produkte zu identifizieren. In dieser Phase werden auch die Zielgruppen und daraus resultierende Produktanforderungen festgelegt. Bei Elektrofahrzeugen geht man derzeit vor allem von drei Hauptnutzergruppen im privaten Bereich aus (Peters und Hoffmann 2011):

- Kunden, die sich von neuen Technologien begeistern lassen
- Kunden, die einen Beitrag zum Umweltschutz leisten wollen
- Kunden, die Wert auf Individualität und Fahrspaß legen

Die Planung der Produktplattform durch die Entwicklungsabteilung und die Bewertung der neuen Technologien sind ebenfalls Teil dieser Phase (Schäppi et al. 2005).



Abb. 5.40 Übersicht Produktentwicklungsprozess. (In Anlehnung an Schäppi et al. 2005)

Unmittelbar danach müssen bereits in der Produktion die entsprechenden Anforderungen identifiziert werden, um von Beginn an bei der Planung des Produktes mitzuwirken und die Supply-Chain-Strategien zu bestimmen. Im Bereich der Forschung müssen die verfügbaren Technologien demonstriert werden, um deren Nutzen und Möglichkeiten genauer abschätzen zu können. Dies ist besonders wichtig, wenn man ganz neue Bereiche wie die der Elektromobilität erschließt, da die technischen Möglichkeiten noch nicht abschließend bekannt sind. Die Finanzabteilung stellt Planungsziele zur Verfügung, damit bereits zu Beginn bekannt ist, welche finanziellen Ziele verfolgt werden. In dieser frühen Phase ist auch das Management entscheidend eingebunden, um die Projektressourcen sinnvoll zuzuteilen und die Zuständigkeiten vom ersten Projektschritt an eindeutig zuzuordnen. Dadurch werden Kompetenzüberschreitungen vermieden. (Schäppi et al. 2005)

Besondere Aufmerksamkeit benötigen in der Elektromobilität die entscheidenden Schlüsseltechnologien: der Elektromotor als Energiewandler und die Batterie als Energiespeicher. (Wallentowitz et al. 2010)

5.6.2.2 Konzeptentwicklung

Während der Konzeptentwicklung erfasst das Marketing die Kundenbedürfnisse. Nur so kann sichergestellt werden, dass das zu entwickelnde Elektromobil auch Akzeptanz beim Kunden findet. In einem weiteren Schritt müssen die wichtigsten Kundengruppen identifiziert werden, um von Beginn an die Hauptzielgruppe direkt ansprechen zu können. So muss rechtzeitig bestimmt werden, ob zu der Hauptzielgruppe von Elektrofahrzeugen neben bereits beschriebenen Privatkunden auch Gewerbekunden wie Pflege- oder Lieferdienste zählen (Peters und Hoffmann 2011). Außerdem bedarf es einer ständigen Recherche und Kontrolle, was von Mitbewerbern entwickelt wurde bzw. aktuell entwickelt wird. So ist eine ständige Überprüfung der eigenen Marktposition möglich. In der Entwicklung wird geprüft, welche Produktkonzepte realisierbar und technisch umsetzbar sind. Aus dieser Überprüfung folgt die Entscheidung, welche Prototypen letztendlich entwickelt werden sollen. Die Produktion muss möglichst genau die Herstellkosten abschätzen und grundsätzlich die Produktionsmöglichkeiten bewerten. Nur so ist es möglich, einen genauen Überblick über die anfallenden Kosten der Herstellung zu haben und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Produktes von Anfang an abschätzen zu können. Die Finanzabteilung leistet Unterstützung bei der ökonomischen Analyse und verfeinert so die Berechnungen. Die Rechtsabteilung muss sich frühzeitig mit Fragen rund um die entsprechenden Patente beschäftigen. Oft wird dieser Punkt nicht ausreichend früh und intensiv genug beachtet. Dadurch können z. T. erhebliche Zusatzkosten entstehen. (Schäppi et al. 2005)

Ein wichtiger Ansatz, um die teilweise sehr hohen Kosten der Elektromobilität, die vor allem durch die Batterien entstehen, zu senken, ist die Modularisierung (Matthies et al. 2010).

Göpfert beschreibt sie folgendermaßen: Die Bauteile sind möglichst unabhängig voneinander und nur durch wenige Schnittstellen miteinander verbunden, um die Systemkomplexität zu reduzieren (Göpfert und Steinbrecher 2000). So lassen sich äußerst komplexe

Systeme beherrschen und deutlich schneller entwickeln. Mit der Modularisierung der Bauteile können die einzelnen Komponenten unabhängig und damit gleichzeitig entwickelt werden und nicht wie sonst üblich abhängig voneinander und somit nacheinander. Die Modularisierung verlangt allerdings einen deutlichen Mehraufwand an Organisation. Da die Komponenten gleichzeitig entwickelt werden, müssen ständig Absprachen getroffen werden. Dies wird noch erschwert, da im Zuge der Globalisierung die einzelnen Entwicklungsstandorte oft räumlich voneinander getrennt sind.

Zuständigkeiten und Entscheidungsträger sollten deutlich voneinander getrennt sein, um Überschneidungen zu vermeiden.

Um ein Optimum an Kosten und Durchlaufzeit zu erreichen, müssen auch die Organisationsstrukturen modularisiert werden. Die einzelnen Entwicklungsprojekte müssen stets abgeglichen und überprüft werden. Hierbei wäre eine zu starre Organisationsform hinderlich. Stattdessen muss zu jeder Zeit gewährleistet sein, dass man immer passend auf die neuen Situationen reagieren kann.

Ist die modularisierte und standardisierte Organisationsstruktur geschaffen, kann sie bei möglichen Änderungen schnell erweitert und entsprechende Module können ausgewählt werden.

Durch die Modularisierung ist es möglich, eine Vielzahl von mittelständischen Unternehmen in die Elektromobilproduktion einzubinden, da es diesen aufgrund ihrer geringen Kapazitäten oft nicht möglich ist, ihre guten Ideen und Lösungen für die hohen Stückzahlen der Serienproduktion bereitzustellen.

Die Modularisierung hat neben dem organisatorischen Mehraufwand weitere Nachteile. So können zwar schnell neue Produkte entwickelt werden, da man sich jetzt nur noch aus dem Modulbaukasten „bedienen“ muss, aber oft sind diese Lösungen nicht optimal aufeinander abgestimmt, das volle Potenzial wird nicht ausgeschöpft.

Außerdem wird es durch die vielen standardisierten Teile zunehmend schwerer, das eigene Produkt von den anderen abzugrenzen.

Sind die Schnittstellen zwischen den einzelnen Modulen standardisiert, können problemlos einzelne Module ausgetauscht und erweitert werden.

Es gibt aber auch Schnittstellen zwischen der technischen und der organisatorischen Modularität. So wird bspw. stets ein organisatorischer Aufwand benötigt, wenn zwei Module über die Schnittstellen miteinander verbunden werden, da diese in der Regel in unterschiedlichen Projektteams oder Abteilungen entwickelt werden. (Göpfert 1998)

5.6.2.3 Systemgestaltung

In der dritten Phase der Systemgestaltung werden Produktfamilien erstellt, also die verschiedenen Modellvarianten der Elektromobile. Hier wird das gesamte Produktportfolio entwickelt, das dem Kunden angeboten wird. Außerdem werden für die einzelnen Produkte die Zielpreise festgelegt. Im Bereich der Entwicklung werden alternative Produktarchitekturen und Schnittstellen erarbeitet (Neuhausen 2002). Die Produktion befasst sich nun näher mit den Lieferanten der Schlüsseltechnologien der Elektromobilität. Diese Zusammenarbeit wird immer wichtiger, da eine Vielzahl von Komponenten bereits als

ganze Baugruppen von den Lieferanten geliefert werden. Darüber hinaus wird inzwischen viel Entwicklungsarbeit direkt von den Lieferanten durchgeführt (Eversheim 2006). Ein Beispiel ist die Kooperation zur Entwicklung von Elektromotoren der Daimler AG mit der Robert Bosch GmbH (Krust 2011) (vgl. Abschn. 3.3). Parallel wird das Montageschema entwickelt und die genauen Bedarfsmengen werden bestimmt (Schuh 2006). In diesem Zusammenhang werden mit Hilfe der Finanzabteilung Make-or-Buy-Entscheidungen getroffen. Zu diesem Zeitpunkt befasst sich auch der Service mit dem Produkt. Es werden zu erwartende Wartungs- und Reparaturintervalle geplant und dafür benötigte Ressourcen bereitgestellt. Eine entsprechende Schulung der Mitarbeiter für die jeweiligen Produkte ist ebenfalls notwendig. Zudem muss bei Elektromobilen darauf geachtet werden, dass nun auch Hoch-Volt-Techniker und Elektroniker sowohl für die Produktion als auch für die Wartung gebraucht werden.

Insgesamt werden also in dieser Phase der Produktumfang und das Sourcing- und Montagekonzept erstellt.

5.6.2.4 Detailgestaltung

In dieser Phase ist vorrangig die Entwicklungsabteilung tätig, um ausgereifte Daten weitergeben zu können. Dazu definiert sie die Teilgeometrien und Toleranzen (Ulrich und Eppinger 2000).

Zeitgleich wird ein Marketingplan erstellt. Es wird genau festgelegt, wie, wo und wann geworben wird und wie hoch der dafür vorgesehene Etat ist.

Außerdem werden die zu verwendenden Materialien ausgewählt. Dabei müssen mehrere Punkte beachtet werden: Die Materialien müssen funktionsorientiert sein und die geforderte Anwendung erfüllen, denn es werden wirtschaftliche Entscheidungen aufgrund einer Kombination aus kostengünstigem Material und entsprechenden Verarbeitungsverfahren erwartet. Außerdem muss eine preisgünstige Demontage gewährleistet sein, die eine umweltbewusste Entsorgung ermöglicht (Czichos und Hennecke 2004). Um bei Elektromobilen das hohe Gewicht der Batterien kompensieren zu können, muss der Leichtbau fokussiert werden. Auch muss das Industriedesign (Produktdesign) komplett dokumentiert werden, um jederzeit darauf zugreifen zu können. In der Produktion werden die genauen Produktions- und Qualitätssicherungsprozesse erarbeitet, Überprüfungsintervalle, Messmethoden und Messtoleranzen müssen festgelegt werden. Besonders zu überprüfen sind angelieferte Zukaufteile darauf, ob sie den internen Qualitätsanforderungen genügen. Es muss eine Liste der benötigten Werkzeuge erstellt werden. Sind diese noch nicht vorhanden, müssen sie entweder selber hergestellt oder eingekauft werden. (Schäppi et al. 2005)

5.6.2.5 Test und Optimierung

In der anschließenden Phase „Test und Optimierung“ werden die Produktmerkmale, Strategien und Prozesse kontrolliert und angepasst.

Dies umfasst zum einen die Entwicklung von Markteinführungsstrategien mit entsprechenden Werbematerialien und die Unterstützung von Feldtests. Hierbei ist es wichtig, dass man einen Überblick darüber erhält, wie das Elektrofahrzeug von den Kunden

angenommen wird, um ggfs. noch Optimierungen durchzuführen. In der Entwicklung werden sämtliche benötigten Tests über Verlässlichkeit, Leistung und Lebensdauer durchgeführt (Neuhausen 2002). Dies kann u. a. mit realen Versuchen – bei Fahrzeugen für die Unfallsicherheit durch Crashtests – erfolgen. Heutzutage werden eine Vielzahl dieser Tests durch Computersimulationen erbracht. Diese Simulationen sind z. T. erheblich kostengünstiger als Prototypenversuche. Bisher wurden keine Sicherheitsbedenken bei Elektrofahrzeugen durch Crashtests festgestellt (Brieter 2011). Außerdem müssen alle Genehmigungen vorliegen, geprüft und letzte Designänderungen erbracht werden.

In der Produktion werden nun die genauen Fertigungs- und Montagevorgänge erarbeitet, um einen stabilen Anlaufprozess sicherstellen zu können. Die beteiligten Mitarbeiter werden durch Schulungen auf ihre bevorstehenden Arbeitsvorgänge bestmöglich vorbereitet. Für die Elektromobilproduktion wird Fachpersonal der Hoch-Volt-Technik gebraucht. Schlussendlich müssen nun die exakten Qualitätssicherungsstandards feststehen (Ulrich und Eppinger 2000).

Vom Vertrieb wird der Verkauf genau geplant, um bei der Markteinführung das Elektromobil zielgenau dem Kunden präsentieren und anbieten zu können.

5.6.3 Vom Prototyp zur Serienfertigung – Anlaufmanagement in der Elektromobilproduktion

Aufgrund diverser Unsicherheitsfaktoren bei den Kundenerwartungen, Marktanforderungen, der Wettbewerbssituation und der zu produzierenden Stückzahlen benötigt der Serienanlauf in der Elektromobilproduktion viel Aufmerksamkeit. Dabei steht die Skalierbarkeit der Produktion im Mittelpunkt. (Schönfelder et al. 2009; Hüttl et al. 2010)

Es gibt zahlreiche Parallelen zum Serienanlauf der konventionellen Automobilproduktion, aber neue Herausforderungen bedingen angepasste Handlungsspielräume und -schwerpunkte (Hüttl et al. 2010). Maßgeblich für den Erfolg oder Misserfolg des Produktes ist das Management des Serienanlaufs vor dem Hintergrund von Time-to-Market und Time-to-Volume sowie von Kosten, Qualität und Produktkomplexität (Straube 2004).

Der Serienanlauf kennzeichnet zugleich die Phase der Überführung einer abgeschlossenen Prototypentwicklung bis hin zur Serienproduktion bei voller Kapazitätserreichung und beinhaltet damit auch den Produktionsstart (Wiesinger und Housein 2002). Er wird in drei Hauptphasen unterteilt (s. Abb. 5.41).

In der Vorserie werden unter möglichst seriennahen Bedingungen Prototypen hergestellt, aber noch nicht alle Teile mit Serienwerkzeugen produziert. Diese Phase dient hauptsächlich der Problemfrüherkennung, der Prozessverbesserung und der Mitarbeiterqualifikation. (Schuh et al. 2008)

Die Nullserie stellt eine seriennahe Produktion dar, weil alle verwendeten Teile den späteren Serienwerkzeugen entstammen und auch Zulieferer bereits unter Serienbedingungen fertigen. Spätestens mit Beginn der Nullserie müssen sämtliche Komponenten, auch die der zugekauften Teile, vollständig definiert sein und eine detaillierte

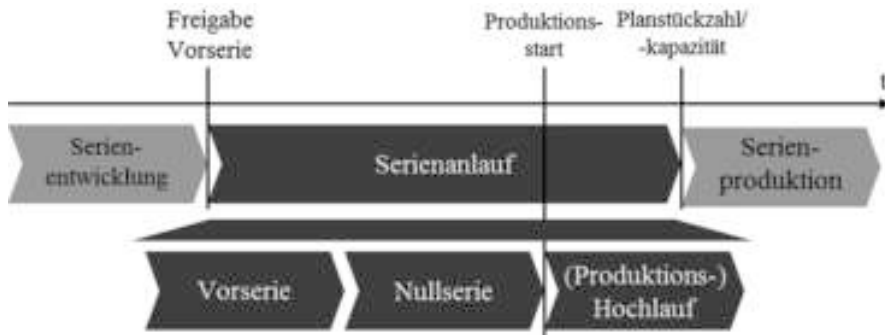


Abb. 5.41 Phasen des Serienanlaufs. (In Anlehnung an Gentner 1994; Wangenheim 1998)

Kostenabschätzung muss vorliegen. Der Beginn der Nullserie wird auch als Launch approval bezeichnet. Vor- und Nullserie werden oftmals aufgrund des erheblichen Aufwands zu einer Pilotserienproduktion zusammengefasst. (Baumgarten und Risse 2001; Schuh et al. 2008; Wangenheim 1998)

Mit der Freigabe für die Serie beginnt der Produktionsstart und somit der Produktionshochlauf. Er ist beendet (und damit auch der Serienanlauf), wenn eine stabile Produktion erreicht ist und geplante Stückzahlen unter Serienbedingungen gefertigt werden. (Wangenheim 1998; Baumgarten und Risse 2001)

Der Serienanlauf als Verbindungselement von Serienentwicklung und Serienproduktion hat ein enormes Optimierungspotenzial, da in dieser Phase zahlreiche Handlungsfelder und Stellhebel zur Komplexitätsreduktion, Verbesserung und Einsparung existieren. Deshalb ist für die Beherrschung dieser kritischen Phase ein ganzheitliches und kontinuierliches Anlaufmanagement zentral. (Schuh et al. 2005; Kuhn et al. 2002)

Gleichzeitig wird vor dem Hintergrund neuer, teils noch unbekannter Herausforderungen der Elektromobilproduktion die Anwendung eines integrierten Anlaufmanagementmodells empfohlen. Es besteht aus drei Kernkomponenten: den Akteuren, den Managementdimensionen sowie den Zieldimensionen und deren Wirkzusammenhängen (s. Abb. 5.42). (Schuh et al. 2008)

Im Folgenden wird auf die sieben erfolgskritischen Managementdimensionen Anlaufstrategie, Anlauforganisation, Lieferantenmanagement, Logistikmanagement, Produktionsmanagement, Änderungsmanagement und Kostenmanagement eingegangen und es werden Besonderheiten und Unterschiede der Elektromobilproduktion im Vergleich zur konventionellen Automobilproduktion diskutiert.

5.6.3.1 Anlaufstrategie

Die Anlaufstrategie ist ein übergeordnetes Regelwerk für sämtliche Anläufe eines Unternehmens an allen Standorten sowie Handlungsgrundlage für am Serienanlauf beteiligte Unternehmen. Zugleich operationalisiert sie die Ziele der Unternehmensstrategie auf den Serienanlauf. (Schuh et al. 2008)

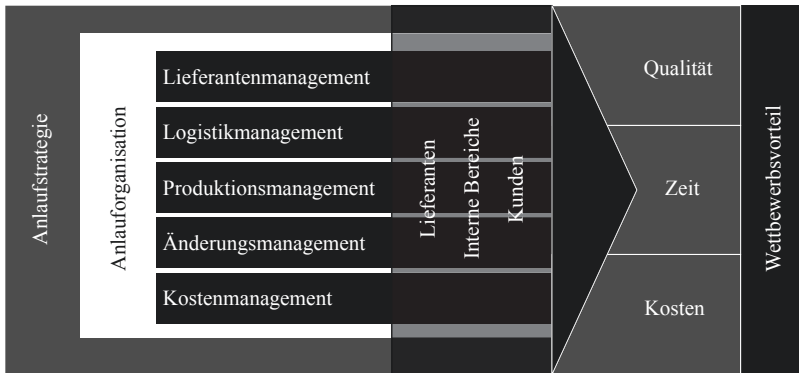


Abb. 5.42 Integriertes Anlaufmanagementmodell. (In Anlehnung an Schuh et al. 2008)

Unternehmensstrategien konventioneller Automobilhersteller zielen auf einen „First-Mover“-Strategieansatz ab, der zur Generierung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile durch Monopolrenten („Pioniergewinne“) führen kann (Wiesinger und Housein 2002). Er ist für die noch wenig standardisierte Produktion von Elektrofahrzeugen besonders interessant. Der Wettstreit um eine Vormachtstellung in der Elektromobilproduktion hängt somit auch von einer geeigneten Anlaufstrategie und einem erfolgreichen Anlaufmanagement ab.

Eine auf Wettbewerbsvorteil ausgelegte Anlaufstrategie muss die drei Zieldimensionen Zeit, Kosten und Qualität integriert betrachten und gleichzeitig Bindeglied zu vor- und nachgelagerten Entwicklungs- und Produktionsprozessen sein (Schuh et al. 2008). Sie übernimmt damit die phasen- und funktionsübergreifende Koordination innerhalb eines Unternehmens und stellt die Anschlussfähigkeit der Funktionen und Bereiche weiterer Produktionsstandorte sowie sämtlicher am Anlauf beteiligten Unternehmen sicher. (Pfohl und Gareis 2000; Schuh et al. 2008)

Für die Formulierung einer Anlaufstrategie stehen die Konzepte des strategischen Flexibilitäts-, Komplexitäts-, Qualitäts- und Kostenmanagements zur Verfügung, die in den Managementdimensionen des integrierten Anlaufmanagementmodells verankert sind. Für einen erfolgreichen und reibungslosen Serienanlauf sind die Flexibilitätssteigerung und die Komplexitätsreduktion wichtige Eckpfeiler einer Anlaufstrategie, da sie deutlich zu einer verbesserten Anlaufperformance beitragen. (Schuh et al. 2008)

5.6.3.2 Anlauforganisation

Die Anlauforganisation dient der funktions- und unternehmensübergreifenden Abstimmung und Integration im Serienanlauf und verringert Effizienz- und Effektivitätsverluste an diesen Schnittstellen. Sie strukturiert die beteiligten Bereiche des Serienanlaufs räumlich und formal in einer Anlauf-Aufbauorganisation und legt in einer Anlauf-Ablauforganisation ihre zeitlichen und logischen Beziehungen zueinander fest (Schuh et al. 2008).

Die Aufbauorganisation gibt die strukturellen Rahmenbedingungen vor, während die Ablauforganisation die Arbeits- und Informationsprozesse regelt (Frese 1998; Schmidt 1994). Zur ablauforganisatorischen Strukturierung und Unterstützung der Serienanläufe werden standardisierte Regelwerke und Methoden wie bspw. das Gateway-Konzept eingesetzt. Dies gilt für die konventionelle Automobilproduktion und auch für die Elektromobilproduktion. Es definiert die für alle Anlaufbeteiligten wichtigsten Phasen und Meilensteine und weist eindeutig Verantwortlichkeiten und Arbeitsumfänge zu. (Schuh et al. 2008)

Zudem gibt es verschiedene Grundtypen von Anlauforganisationen, von temporären Projektorganisationen über spezielle Anlaufteams bis hin zu Linienorganisationen, die nach Unternehmensvoraussetzungen und -bedürfnissen ausgewählt werden müssen. Hinsichtlich der noch unbekannten Stückzahlen von Elektrofahrzeugen und der Wettbewerbssituation hat bei der Auswahl einer geeigneten Anlauforganisation die Skalierbarkeit der Produktion hohe Priorität.

Ohne eine klar definierte Anlauforganisation und -struktur sind Verantwortlichkeiten, Rollenverständnisse und Schnittstellen unzureichend geregelt. Dies führt zu Kompetenzmangel, fehlender Kooperationsbereitschaft und Ressourcenkonflikten (Schuh et al. 2008).

Zur Anlauforganisation gehört auch die Definition des Aufbaus, der Aufgaben und der Kompetenzen von Anlaufteam und Anlaufmanager. Die Arbeit dieser Akteure startet mit dem Beginn der Nullserienproduktion und endet mit der stabilen Serienproduktion. Aufgrund der interdisziplinären Zusammensetzung des Anlaufteams aus unterschiedlichen Funktionsbereichen eines Unternehmens und der dadurch konzentrierten fachlichen und methodischen Kompetenz kann das Anlaufteam Probleme schnell und effizient lösen. Der Anlaufmanager trägt die Verantwortung für die erfolgreiche Durchführung des Serienanlaufs und koordiniert dessen Planung, Steuerung und Kontrolle. Er ist mit Weisungsbefugnis ausgestattet, hat ein ausgeprägtes technisches Produkt- und Prozesswissen und verfügt zudem über sehr gute Kunden- und Lieferantenkontakte. (Fitze 2004; Schuh et al. 2008)

5.6.3.3 Lieferantenmanagement

Das Lieferantenmanagement ist in der konventionellen Automobilproduktion eine der wichtigsten Managementaufgaben, um die Qualitäts-, Zeit- und Kostenziele des Anlaufmanagements zu erreichen. In der Elektromobilproduktion hat es eine Schlüsselrolle. Aufgrund des höheren Outsourcing-Grades und der daraus resultierenden sinkenden Fertigungstiefe der OEMs ist die Kooperation mit internen und externen Partnern von signifikanter Bedeutung (McKinsey 2003). Komplexe Module und Systeme werden von Lieferanten selbstständig als sog. „Black box“ entwickelt und zugeliefert (Schuh et al. 2008). So ist bspw. in der konventionellen Automobilproduktion der Motor die entscheidende Kernkompetenz, die in der Regel beim OEM liegt. Bei der Elektromobilproduktion ist die Batterie eine entscheidende Kernkompetenz, die beim Lieferanten liegt und als fertiges Modul zugeliefert wird. Dies zeigt, dass der OEM vermehrt zu einer koordinierenden Instanz in einem Lieferantennetzwerk wird.

Dadurch gewinnt die frühzeitige Identifikation und Integration anlaufkritischer Lieferanten an Relevanz (Schuh et al. 2008).

Gleichzeitig liegen wichtige Determinanten des ökonomischen Erfolgs nicht mehr in unmittelbaren, internen Einflussbereichen des Unternehmens, sondern werden im Zuge der Verlagerung von Wertschöpfungsanteilen auf die Lieferanten übertragen (Stölzle und Kirst 2006). Darüber hinaus durchlaufen einige Kaufteile wie bspw. Batterie oder Elektromotor ebenfalls eine Anlaufphase und stellen dadurch ein erhöhtes Risiko dar. Aus diesen Gründen muss das Lieferantenmanagement eine frühzeitige Lieferanteneinbindung, besonders von anlaufkritischen Lieferanten wie den Batterieproduzenten, fokussieren (Schuh et al. 2008; Hahn und Kaufmann 2002).

5.6.3.4 Logistikmanagement

Die Logistik gilt aufgrund ihres integrativen Charakters als zentrale Koordinationsinstanz im Unternehmen (Schuh et al. 2008). Die Phasen der Produktentwicklung müssen zeitnah bzw. simultan einen aktiven Einfluss auf die jeweilige Phase der Prozessentwicklung haben. Zugleich sollte ein reger Informationsrückfluss zwischen den einzelnen Phasen herrschen, um Mängel frühzeitig zu identifizieren und zu korrigieren. Die hohe logistische Komplexität des Serienanlaufs impliziert den Bedarf nach stabilen und standardisierten Logistikprozessen. Als Instrumente tragen integrative Logistikkonzepte dazu bei, Produktionsstörungen noch vor dem Serienanlauf zu identifizieren und zu vermeiden (Witt 2006). Insbesondere die Absicherung des Materialflusses sowie die Reduzierung innerbetrieblicher Logistikstörungen zwischen Abladestelle und dem Verbauort stehen hier im Fokus. (Fitzek 2006; Kirst 2006)

5.6.3.5 Produktionsmanagement

Neuartige, nicht ausgereifte Prozesse und starke Kapazitätsschwankungen durch unbekannte Stückzahlen fordern ein hohes Maß an Flexibilität im Serienanlauf der Elektro mobilproduktion. Vor diesem Hintergrund befasst sich das Produktionsmanagement hauptsächlich mit den Aspekten der Werkstruktur und der Betriebsmittelplanung sowie der Produktionsstandardisierung und der Befähigung der Mitarbeiter (Schuh et al. 2008). Ziel ist es, die Vielzahl an ungeplanten und unvermeidbaren Störungen im Anlauf zu reduzieren und die prozessbeteiligten Mitarbeiter zu befähigen, mit Störungen lösungsorientiert umzugehen (Schuh et al. 2008). In Kap. 1 wurde bereits gezeigt, dass Normen und Standards in der Elektro mobilproduktion notwendig sind, um Schwierigkeiten im Serienanlauf – bedingt durch den Neuigkeitsgrad der Prozesse und Produktionsmittel – beherrschbar zu machen. Elektromotoren besitzen eine geringere Komplexität als Verbrennungsmotoren, daher sind Anlaufprozesse evtl. robuster. Trotz der anhaltenden Entwicklung in der Batterieproduktion, des Baus der „Gigafactory“ und damit der Verdoppelung der momentanen weltweiten Produktionskapazität durch Tesla (2013), stellt die Batterieproduktion derzeit noch ein Risiko dar (Hüttl et al. 2010), dessen Ausmaß für den Serienanlauf noch ungewiss ist.

5.6.3.6 Änderungsmanagement

Änderungen sind definiert als alle nachträglichen Anpassungen von freigegebenen, d. h. verbindlich festgelegten Arbeitsergebnissen (Zanner et al. 2002). Im Serienanlauf stellen Änderungen maßgebliche Kosten- und Zeittreiber dar, deshalb ist es Ziel des Änderungsmanagements, die Termintreue der Prozesse im Serienanlauf sicherzustellen und gleichzeitig Durchlaufzeiten zu reduzieren. Mittel dafür sind präventive Maßnahmen der Änderungsplanung sowie die Implementierung und Nutzung von Standardänderungsprozessen (Schuh et al. 2008).

Der Zeitpunkt von Änderungen spielt eine große Rolle. In den ersten Phasen des Produktentwicklungsprozesses sind Änderungen mit dem geringsten Aufwand zu realisieren (Jania 2004). Doch schon allein in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase beanspruchen Änderungen bis zu 40 % der Gesamtressourcen (Lindemann und Reichwald 1998). Auf der anderen Seite sind Änderungen nicht nur als Störgröße zu sehen, da sie auch zu Qualitätssteigerungen und Kostenreduzierung bei Produkten und Prozessen führen. Es darf also nicht allein die Anzahl der Änderungen minimiert werden, sondern der Zeitpunkt dafür muss in die frühe Phase des Produktentwicklungsprozesses verlagert werden (Schuh et al. 2008).

Das Ausmaß von Änderungen ist ebenfalls unterschiedlich. Einerseits gibt es Änderungen, die nur unternehmensintern koordiniert werden müssen, Änderungen in Entwicklungspartnerschaften hingegen unter sämtlichen beteiligten Partnern (Schuh et al. 2008). Diese Entwicklungspartnerschaften spielen in der Elektromobilproduktion eine größere Rolle als noch in der konventionellen Automobilproduktion (vgl. Abschn. 4.3.2). Dies muss bei der unternehmensübergreifenden Koordination von Änderungen im Änderungsmanagement berücksichtigt werden.

Gleichzeitig steigen durch teilweise neuartige Prozesse und unbekannte Stückzahlen die Eintrittswahrscheinlichkeit und Bedeutung von Änderungsvorhaben während der Produktentstehung. Deshalb ist die Implementierung von Standardänderungsprozessen von großer Signifikanz (Schuh et al. 2008).

5.6.3.7 Kostenmanagement

Dem Kostenmanagement im Serienanlauf kommen die Aufgaben der Kostensteuerung und der Identifikation von Kostentreibern zu, um die Profitabilität des Gesamtserienanlaufs sicherzustellen (Stölzle et al. 2005; Schuh et al. 2008). Dabei beeinflussen die weiteren Zieldimensionen Zeit und Qualität über ihre Auswirkungen auf den kompletten Produktlebenszyklus und die damit entstehenden Folgekosten bzw. Erlösausfälle den Erfolg und die Gewinnmarge des Produktes (Wiesinger und Housein 2002). Sowohl Terminverzögerungen wie auch Qualitätsmängel haben Auswirkungen auf die direkten und indirekten Kosten des Serienanlaufs (Möller 2002; Schneider und Lücke 2002). Häufig impliziert ein verschobener Verkaufsstart den finanziellen Misserfolg eines Produktes am Markt (Kuhn et al. 2002). Deshalb müssen Instrumente zum Einsatz kommen, die möglichst alle Zieldimensionen abdecken und deren Wechselwirkungen beachten (Möller 2002). Instrumente zur Kostensteuerung im Anlauf sind Frontloading-Konzepte wie bspw.

die digitale Simulation oder Design for Manufacturing and Logistics, bei denen Probleme frühzeitig im Entwicklungsprozess identifiziert werden, um Folgekosten zu minimieren (Thomke und Fujimoto 2000; Wildemann 2006).

Für die Elektromobilproduktion spielen die Kosten eine äußerst wichtige Rolle, um sich im Wettbewerb gegenüber der konventionellen Automobilproduktion zu etablieren. Maßgeblicher Kostentreiber ist weiterhin die Batterie. Obwohl in den letzten Jahren stetige Kostendegressionen verzeichnet wurden, liegen die Batteriepreise im Jahr 2017 immer noch bei ungefähr 250–300 \$/kWh und damit noch rund \$100 über dem erklärten Preisziel für eine weitreichende Kommerzialisierung (SEI 2015).

5.6.3.8 Produktionsstart

Die letzte Phase ist der Produktionsstart. Alle Bedingungen müssen erfüllt sein, um die Serienproduktion starten zu können. Das gesamte Produktionssystem läuft an. Die Produktion beginnt mit den Schlüsselkunden. Die Entwicklung muss die erste Produktionsserie genau analysieren und überprüfen, um Probleme auszuschließen. Andernfalls müssen Änderungsmaßnahmen anhand des Standardänderungsprozesses getroffen werden. (Schäppi et al. 2005)

5.6.4 Zulassung und Zertifizierung von Batteriepacks

Das zentrale Kernelement in der Elektromobilität bildet der Energiespeicher. Obwohl die Erfindung der Batterie als Speichermedium bereits drei Jahrhunderte zurückliegt, eröffnen sich noch heute enorme Potenziale in der Weiterentwicklung von Leistungsfähigkeit und Energiedichte. In diesem Zusammenhang dürfen die Sicherheitsanforderungen an die Batterie nicht vernachlässigt werden. Dies hat zu einer Fülle an Regulierungen, Vorschriften und Normen in Bezug auf Produkt- und Transportsicherheit auf dem globalen Markt sowie im länderspezifischen Kontext geführt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dieser Thematik und den daraus resultierenden Folgen für Zell- und Batteriehersteller sowie OEMs.

5.6.4.1 Klassifizierungen

Der aktuelle Batteriemarkt bietet eine Vielzahl an Produkten und Speicherlösungen verschiedenster chemischer Material-konstellationen für alle nur denkbaren Anwendungsmöglichkeiten. Die Lithium-Ionen-Technologie kann nach dem heutigen Stand die Anforderungen eines großen Speichersystems in Bezug auf Lebensdauer, Sicherheit sowie Leistungs- und Energiedichte für den Einsatz im Elektromobilbereich am besten erfüllen. (Kampker 2014, S. 48)

Die übergeordnete Klassifizierung von Batterien, nach der auch der Gesetzgeber unterscheidet, erfolgt in die Bereiche Primärbatterien (einmalige Entladung), Sekundärbatterien (Akkumulatoren) und tertiäre Batterien (z. B. Brennstoffzelle). Sekundärbatterien besitzen die Kerneigenschaft nach der Entladung wieder aufladbar zu sein. (Reiner Kort-hauer 2013, S. 371–380)

Zur Unterscheidung von reinen Starterbatterien wird für den Energiespeicher in reinen Elektrofahrzeugen der Begriff Traktionsbatterie verwendet. Dieser besteht dabei grundsätzlich aus drei Komponenten: Batteriezellen, Gehäuse mit Schutz- und Kühlfunktion sowie dem Batteriemanagementsystem (kurz BMS) (Achim Kampker 2014, Elektromobilproduktion, S. 58 f). Deshalb ist zu beachten, dass sowohl für jede Komponente als auch für den Gesamtverbund Vorlagen und Richtlinien vorliegen.

5.6.4.2 Institutionen, Standards und Normen

In Bereichen, in denen mit gespeicherter Energie, in welcher Form auch immer, gearbeitet wird, ist der Sicherheitsaspekt von besonderer Bedeutung. Die Reduzierung von Gefahrenpotenzialen auf den Ebenen Zelle, Modul, Batteriepack und letztendlich auf der Fahrzeugebene macht daher einheitliche Sicherheitsvorgaben unumgänglich. Ein Fehler auf einer dieser Ebenen kann gefährliche Konsequenzen für die weiteren Ebenen bedeuten (Doughty, Dan, and E. Peter Roth. „A general discussion of Li ion battery safety.“ *Electrochemical Society Interface* 21.2 (2012): 37–44.). Aus diesem Grund wurden einheitliche Standards zur Zulassung in den jeweiligen Märkten eingeführt. Die Standards werden von Normungsinstitutionen festgesetzt und überwacht. Relevante nationale sowie internationale Institutionen sind in unten stehender Tab. 5.6 aufgeführt.

Diese Institutionen legen fest, welche Normen und Standards zur Zulassung der Traktionsbatterie erfüllt sein müssen, bevor diese im Fahrzeugverbund auf den Markt kommt. Unter Zulassung wird in diesem Kontext eine Erlaubnis seitens der zuständigen Behörden verstanden, ein Produkt auf dem Markt in Verkehr zu bringen. Bezogen auf die Batterie ist das „in Verkehr bringen“ für den deutschen Rechtsraum im Batteriegesetz (§ 2 Abs. 16 BattG) definiert. Häufig wird auch der Begriff Homologation dafür verwendet (vgl. Abschn. 5.1). Ein Beispiel für eine standardisierte Zulassungsgrundlage stellt die ECE-Homologation dar, in der sich die ECE-Signatarstaaten zu einer einheitlichen Anerkennung von Zertifizierungen und Normen verpflichten (vgl. Abschn. 5.6.1.1).

Normen bilden heute die Basis nahezu aller Entwicklungen des technischen Lebens. Sie bilden die Grundlage für Unternehmen, ihre Produkte in nationalen und internationalen Märkten zu vertreiben und dabei rechtlich abgesichert zu sein (Schönau und Baumann 2013, S. 371).

Tab. 5.6 Übersicht der relevanten Normierungsinstitutionen im Bereich Batterie

Kürzel	Institution	Wirkungskreis
ISO	International Organization for Standardization	international
IEC	International Electrotechnical Commission	international
CEN	Comité Européen de Normalisation	europaweit
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique	europaweit
DIN	Deutsches Institut für Normung	deutschlandweit
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE	deutschlandweit

Die länderspezifischen Normungsinstitutionen wie das Deutsche Institut für Normung (DIN) sind dabei in der Regel ständige Mitglieder größerer Institutionen wie beispielsweise der „International Organization for Standardization“ (kurz: ISO). Als fundamentale Grundlage finden sich die festgelegten Normen nicht nur in Gesetzestexten, sondern auch in Zertifikaten akkreditierter Labore wieder. Bei der Zertifizierung muss das Batteriepack in speziellen Tests den Nachweis zur Einhaltung festgelegter Normen und Standards liefern.

Anfang des Jahres 2016 wurden die bisher geltenden Zulassungsnormen durch die Einführung der ECE R100 Homologationsprüfung abermals verschärft. Die bereits erwähnten ECE-Signatarstaaten einigten sich auf einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb. Für wiederaufladbare Energiespeichersysteme (REESS) gelten damit beispielsweise neue sicherheitsrelevante Anforderungen in Bezug auf elektrische, mechanische und thermische Sicherheit. Das Batteriesystem wird in unterschiedlichen Prüfungen konkreten Missbrauchsversuchen ausgesetzt, um realistische Betriebsszenarien nachzubilden. Beispielsweise wird das System mit Beschleunigungen bis zu 28 g belastet zur Abbildung der im Crash wirkenden mechanischen Kräfte. Damit erfolgt eine verpflichtende Ergänzung der bisher geltenden Transportnorm UN 38.3, wodurch die bisher geltenden Regelungen deutlich verschärft werden. Die ECE R100 ist nur ein Beispiel für die zukünftig noch stärker auftretende Anzahl an Standardisierungen durch Normen und Regelungen.

Ausgelöst durch die angestrebte Energiewende und die rasante technische Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterien sind Standards für den Betrieb in den unterschiedlichsten Einsatzbereichen dringend notwendig um dem Verbraucher das erforderliche Vertrauen und den Herstellern die benötigte Rechtssicherheit zu geben. (Hermann von Schönau und Matthias Baumann 2013, Handbuch der Lithium-Ionen Batterie, S. 371)

5.6.4.3 Internationaler Vergleich

Bevor ein Hersteller auf dem globalen Markt Batteriepacks in Umlauf bringen darf, müssen regional gültige Vorschriften eingehalten werden. Im europäischen Raum ist eine CE-Zertifizierung beispielsweise verpflichtend. In Nordamerika muss dagegen ein Nachweis nach UL und/oder CSA erfolgen. Eine weitere Region bildet der chinesische Raum rund um das CCC-Zertifikat. Teilweise sind sogar länderspezifische Regelungen zu beachten. Die nachfolgende Tabelle beinhaltet eine Übersicht der aktuellen Normenlandschaft für Energiespeicher in der Elektromobilität im deutschen Raum. Zusätzlich sind weitere Normen der Society of Automotive Engineers (SAE) mit internationaler Ausrichtung, aber grundsätzlichem Geltungsbereich in Nordamerika, angefügt. Diese sind speziell für deutsche OEMs mit eben dieser Marktausrichtung von Interesse (Tab. 5.7).

Durch die ständige Mitgliedschaft nationaler Normierungsinstitutionen in den internationalen Gremien werden immer häufiger internationale Standards allgemeingültig übernommen. Die Erarbeitung rein nationaler Normen ist mit einem Anteil von etwa 5 % nur noch sehr gering. Trotzdem werden viele internationale Normen noch immer in die nationalen Kataloge eingepflegt (vgl. Abb. 5.43) und teilweise auch angepasst. Dieser Umstand

Tab. 5.7 Übersicht der Normenlandschaft für Energiespeicher von Elektro- und Hybridfahrzeugen im deutschen Raum. (Quelle: Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0, Nationale Plattform Elektromobilität 2014)

Norm	Beschreibung
IEC/TS 60479-1	Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte
IEC/TS 61439-7	Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel
IEC 61508	Funktionale Sicherheit von elektrisch/elektronisch/programmierbar elektronisch, sicherheitsbezogenen Systemen
IEC 62576	Elektrische Doppelschichtkondensatoren für die Verwendung in Hybridelektrofahrzeugen – Prüfverfahren für die elektrischen Kennwerte
IEC 62660-1	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 1: Prüfung des Leistungsverhaltens
IEC 62660-2	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 2: Zuverlässigkeits- und Missbrauchsprüfung
IEC 62660-3	Lithium-Ionen-Sekundärzellen für den Antrieb von Elektrostraßenfahrzeugen – Teil 3: Sicherheitsanforderungen von Zellen und Modulen
ISO 6469-1	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikationen – Teil 1: On-Board-wiederaufladbares Energiespeichersystem (RESS)
ISO 12405-1	Elektrische Straßenfahrzeuge – Prüfspezifikation für Lithium-Ionen Antriebsbatteriesystem und Batterieteilsysteme – Teil 1: Hochleistungssysteme
ISO 12405-2	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Prüfspezifikation für Lithium-Ionen Antriebsbatteriesysteme und Batteriemodule – Teil 2 Anwendungen mit hohem Energiebedarf
ISO/IEC PAS 16898	Elektrische Straßenfahrzeuge – Abmessungen und Bezeichnungen für aufladbare Lithium-Ionen Batteriezellen
ISO 18243	Elektrisch angetriebene Mopeds und Motorräder – Spezifikationen und Sicherheitsanforderungen für Lithium-Ionen Antriebsbatteriesysteme
ISO 18300	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Spezifikationen für Lithium-Ionen-Batterie-Systeme in Kombination mit Blei-Säure- Batterie oder Kondensator
SAE J 1797	Empfehlungen für die Verpackung von Batterie-modulen in Elektrofahrzeugen
SAE J 1798	Empfehlungen für die Leistungsbewertung von Batteriemodulen in Elektrofahrzeugen
SAE J 2288	Lebenszyklustests von Batteriemodulen in Elektrofahrzeugen
SAE J 2289	Batteriepack-System für den Elektroantrieb: Funktionelle Leitlinien
SAE J 2464	Wiederaufladbare Energiespeicher-Systemsicherheits- und Missbrauchstests für Elektro- und Hybridelektrofahrzeug
SAE J 2929	Sicherheitsstandards für Antriebsbatteriesysteme auf Lithium-Ionen Basis in Elektro- und Hybrid-fahrzeugen

begründet sich durch die unterschiedlichen Rechtsprechungen einzelner Länder und den damit verbundenen gesetzlichen Restriktionen.

Die in Deutschland geltende Rechtsprechung ist für Energiespeicher im sogenannten Batteriegesetz (BattG) verankert. Das Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme

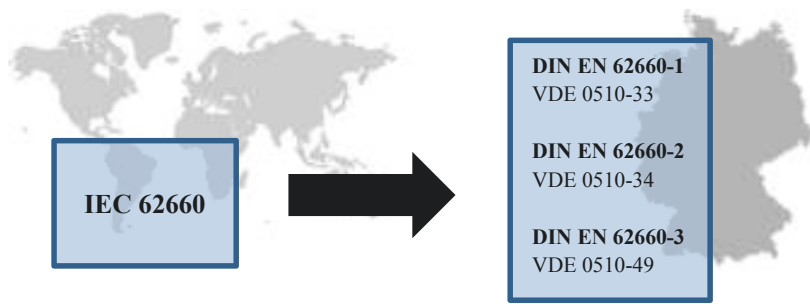


Abb. 5.43 Beispiel der Übernahme wichtiger globaler Normen für den deutschen Rechtsraum

Tab. 5.8 Prüfanforderungen auf thermischer, elektrischer und mechanischer Ebene nach Transportnorm UN T 38.3. (Quelle: VDE-Prüfanforderungen an Li-Batterien für Elektrofahrzeuge, 17.03.2010)

T1 – Höhensimulation	T5 – Externer Kurzschluss
T2 – Temperaturzyklisierung	T6 – Schlag (Zelltest)
T3 – Vibration	T7 – Überladung
T4 – Schock	T8 – Tiefentladung (Zelltest)

und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren setzt die europäische Richtlinie 2006/66/EG in deutsches Recht um. Es trat am 1. Dezember 2009 in Kraft und stellt den rechtlichen Rahmen für Energiespeicher neben den nicht rechtlich verpflichteten Normen von ISO, IEC, CEN und DIN.

5.6.4.4 Transportvorschriften

Seit dem Jahr 2003 gelten für Batterien mit Lithiumanteilen seitens der EU für den Transport besondere Vorschriften. So muss eine Prüfung vor dem kommerziellen Transport der Batterien nach der Vorschrift UN 38.3 durch akkreditierte Labore erfolgen. Dies gilt für sämtliche Transportmöglichkeiten, wie z. B. Straßen- und Schienenverkehr, Binnen- und Seefracht.

Die Transportnorm ist bindend für einen spezifischen Zelltyp bzw. Zellverbund. Bei Veränderungen der Masse von Kathode, Anode oder Elektrolyten oder bei Abweichungen der Nennenergie muss die Zertifizierung wiederholt werden. Ebenso führen Änderungen der Schutzvorrichtungen auf mechanischer, elektrischer und thermischer Ebene dazu, dass der Zellverbund erneut dem Testverfahren nach UN T 38.3 (siehe Tab. 5.8) unterzogen werden muss.

Lithium-Batterien müssen dabei nacheinander acht unterschiedliche Tests durchlaufen, wobei die Anzahl der zu testenden Batterien vom Gewicht abhängt. Liegt das Gewicht bei weniger als 12 kg, so sind acht Batterien zu verwenden. Vier dieser acht Batterien müssen vorab 50 Zyklen durchlaufen. Für ein Gewicht oberhalb von 12 kg reduzieren sich sowohl

die Anzahl der Batterien als auch die vorab durchlaufenen Zyklen um die Hälfte. Diese Festlegungen gelten für die Tests 1 bis 5 sowie Test 7. Ähnliche Bestimmungen gelten auch für Lithium-Zellen. Test 6 und 8 werden ausschließlich auf Zellebene vorausgesetzt.

Für den Transport von Lithium-Batterien im Flugverkehr gelten verschärfte Sicherheitsregelungen. Im Januar 2013 sorgte der Brand durch eine im Dreamliner verbaute Lithium-Ionen-Batterie dafür, dass die Boeing 787 Dreamliner mehrere Monate aus dem Verkehr gezogen werden musste. Es musste festgestellt werden, dass die standardmäßig vorhandenen Feuerschutzanlagen in Passagierflugzeugen die durch Lithium-Ionen-Batterien ausgelösten Brände nicht löschen können

Ab April 2016 wird daher der Transport von Lithium-Ionen-Batterien im Laderaum von Passagierflugzeugen aufgrund der hohen Brandgefahr von der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) verboten. Dies gilt nicht für Batterien in Gepäckstücken von Passagieren, die in Unterhaltungselektronik (z. B. Laptop, Mobiltelefon) eingebaut sind, sondern für den Transport von Batterien in der Beifracht von Passagiermaschinen. Der Beschluss der ICAO ist nicht bindend, jedoch folgen die meisten UN-Mitglieder den Vorgaben der Behörde. (Quelle: ICAO Council Prohibits Lithium-Ion Cargo Shipments on Passenger Aircraft, 22.02.2016, Montreal Canada).

5.6.4.5 Fazit

Die Anzahl der Normen und Standards, welche für den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien im Elektrofahrzeug berücksichtigt werden müssen, sind vielseitig und zahlreich. Darüber hinaus werden in naher Zukunft noch einige Entwicklungen weitere bindender Normen und Vorschriften erwartet, wodurch die Transparenz der Anforderungen zusätzlich erschwert wird. Schließlich werden die Prüfungen zur Erfüllung der Normen mit Prototypen durchgeführt. Dieser Umstand sorgt bereits vor dem Verkauf für hohe Kosten und sollte daher bereits im Entwicklungsbudget einkalkuliert werden.

5.7 Recycling als Teil der Wertschöpfungskette

5.7.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die ursprüngliche Rechtsvorschrift für das Batterierecycling in Europa ist mit der Richtlinie 91/157/EEC der Europäischen Gemeinschaft vom 18. März 1991 in Kraft getreten (EG-Richtlinie [1991](#)). Die ersten Überarbeitungen dieser sog. EU-Batteriedirektive sind mit den Richtlinien 93/86/EEC vom 4. Oktober 1993 und 98/101/EC vom 22. Dezember 1998 erfolgt. (EG-Richtlinie [1993](#); EG-Richtlinie [1998a](#)) Die aktuell gültige Neufassung ist die Richtlinie 2006/66/EC vom 6. September 2006 (EG-Richtlinie [2006](#)), sie hat die ursprüngliche Richtlinie 91/157/EEC außer Kraft gesetzt. Auch die aktuelle Neufassung ist bereits zwei Mal mit den Richtlinien 2008/12/EC vom 11. März 2008 und 2008/103/EC vom 10. November 2008 überarbeitet worden. (EG-Richtlinie [2008](#))

Laut Artikel 1 der EU-Batteriedirektive enthält die Richtlinie „Vorschriften für das Inverkehrbringen von Batterien und Akkumulatoren, insbesondere das Verbot, Batterien und Akkumulatoren, die gefährliche Substanzen enthalten, in Verkehr zu bringen, und spezielle Vorschriften für die Sammlung, die Behandlung, das Recycling und die Beseitigung von Altbatterien und Alttakkumulatoren, die die einschlägigen Abfallvorschriften der Gemeinschaft ergänzen und ein hohes Niveau der Sammlung und des Recyclings der Altbatterien und -akkumulatoren fördern. Sie zielt darauf ab, die Umweltbilanz der Batterien und Akkumulatoren sowie der Tätigkeiten aller am Lebenszyklus von Batterien und Akkumulatoren beteiligten Wirtschaftsakteure, d. h. Hersteller, Vertreiber und Endnutzer, und insbesondere der Akteure, die direkt an der Behandlung und am Recycling von Altbatterien und -akkumulatoren beteiligt sind, zu verbessern“. (EG-Richtlinie 2006)

Die EU-Batteriedirektive schreibt für die Mitgliedstaaten u. a. die Mindestsammelquoten für Altbatterien und -akkumulatoren von 25 % bis zum 26. September 2012 und 45 % bis zum 26. September 2016 vor. Zudem wird für Lithium-Ionen-Batterierecyclingprozesse eine Mindestrecyclingeffizienz von 50 % der durchschnittlichen Batterieschrottmasse vorgeschrieben. (EG-Richtlinie 2006)

Eine einheitliche Methode zur Bestimmung bzw. Berechnung der Recyclingeffizienz von Batterierecyclingprozessen wird jedoch nicht durch die EU-Batteriedirektive vorgegeben. Demzufolge werden gegenwärtig mögliche Berechnungsmethoden in der Batterierecyclingindustrie sehr kontrovers diskutiert, dies betrifft vor allem die Einbeziehung bzw. Nichteinbeziehung bestimmter Batterieinhaltsstoffe wie Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff in die Recyclingeffizienzberechnung. Einige Batterierecyclingunternehmen fordern, dass diese Inhaltsstoffe als wiedergewonnen zu betrachten sind, da sie entweder über Prozessaustragsströme der Umwelt direkt wieder zugeführt werden oder eine stoffliche bzw. energetische Umsetzung erhalten, die für den Recyclingprozess notwendig ist.

Weitere Diskussionspunkte sind die für die Effizienzberechnung zugrunde gelegte Batterieschrottmasse sowie die Berücksichtigung von Schlacken, die in schmelzmetallurgischen Recyclingprozessen anfallen. Bei der Eingangsschrottmasse stellt sich die Frage, ob diese nur Batterieeinzelzellen oder auch komplette Batteriepacks enthalten darf, da letztere neben den eigentlichen Batteriezellen auch aus Verschaltungselektronik- und Gehäusekomponenten bestehen. Die generelle Ablehnung anfallender Schlacken als Recyclingprodukte wird kritisiert, da sie unter bestimmten Voraussetzungen bspw. im Straßenbau eingesetzt und somit als Recyclingprodukt bewertet werden können. Schließlich kommen in vielen Recyclingprozessen Zusatz-/Hilfsstoffe zum Einsatz, die in die Recyclingprodukte übergehen können und dadurch zu einer Erhöhung der Produktmasse beitragen. Hier stellt sich die Frage, ob diese Zusatzstoffe für die Effizienzberechnung wieder von der Produktmasse abgezogen werden müssen.

Im Bereich Recycling sind neben den vorgeschriebenen Mindestsammelquoten und -recyclingeffizienzen die Definitionen der Begriffe „Behandlung“ und „Recycling“ sowie deren Abgrenzung voneinander von besonderem Interesse. Laut Artikel 3 Punkt 10 (EG-Richtlinie 2006) umfasst die Behandlung „alle Tätigkeiten, die an Altbatterien und -akkumulatoren nach Übergabe an eine Anlage zur Sortierung, zur Vorbereitung des

Recyclings oder zur Vorbereitung der Beseitigung durchgeführt werden“. Zudem muss laut Anhang III Teil A Punkt 1 „die Behandlung mindestens die Entfernung aller Flüssigkeiten und Säuren erfassen“. Dem gegenüber wird das Recycling in Artikel 3 Punkt 8 als „die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung von Abfallmaterialien für ihren ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch unter Ausschluss der energetischen Verwertung“ definiert (EG-Richtlinie 2006).

Mit der im März 1998 in Kraft getretenen und im Juli 2001 neugefassten „Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren“ (BattV) erfolgte die deutschlandweite Umsetzung der EU-Batteriedirektive. In der BattV werden den Herstellern, Vertreibern und Endverbrauchern bestimmte Pflichten auferlegt. Hierdurch sollen eine Rücknahme und eine entsprechend den Vorschriften des 1996 in Kraft getretenen „Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (KrW-/AbfG) ordnungsgemäße und schadlose Verwertung bzw. gemeinwohlverträgliche Beseitigung sichergestellt werden. Gemäß der BattV dürfen Batterien nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn von Herstellern und Vertreibern gewährleistet wird, dass diese vom Endverbraucher wieder zurückgegeben werden können. Gleichzeitig ist der Endverbraucher dazu verpflichtet, Altbatterien beim Vertreiber oder bei den von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern eingerichteten Erfassungsstellen abzugeben. Eine Entsorgung im Hausmüll ist für alle Batterietypen verboten. Die Hersteller und Vertreiber sind wiederum zu einer unentgeltlichen Batterierücknahme vom Endverbraucher verpflichtet. (BattV 1998; KrW-/AbfG 1994)

Zu diesem Zweck wurde ein laut der BattV vorgeschriebenes gemeinsames Rücknahme- und Entsorgungssystem eingerichtet, dessen Organisation und Verwaltung der „Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien“ (GRS) obliegt. An der GRS beteiligen sich seit 1998 die Hersteller von ca. 80 % der im deutschen Markt abgesetzten Batterien. Gegründet wurde die GRS von den Batterieherstellern Duracell, Energizer, Panasonic, Philips, Saft, Sanyo, Sony, Varta und dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e. V. (ZVEI). Ende 2008 haben insgesamt 991 Hersteller und Importeure von Gerätebatterien und -akkumulatoren die Serviceleistungen der GRS genutzt. Die GRS ist als gemeinnützige Organisation zu verstehen und hat über 170.000 Sammelstellen zur Rücknahme verbrauchter Batterien eingerichtet. Die Altbatterien werden in regelmäßigen Abständen abgeholt, nach Batteriesystemen sortiert und schließlich entsorgt bzw. verwertet. Zudem ist die GRS für eine Abfallberatung und eine Information der Öffentlichkeit verantwortlich. Zusätzlich wird den Bundesländern ein jährlicher Erfolgsbericht vorgelegt, der Auskunft über die in Verkehr gebrachte Batteriemasse, die zurückgenommene Batteriemasse, die qualitativen und quantitativen Entsorgungsergebnisse sowie die gezahlten Preise für Entsorgungsleistungen gibt. (BattV 1998; Döhring-Nisar et al. 2001; Fricke 2009; Bundesministerium 2001)

Im Dezember 2009 trat das „Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren“ (BattG) in Kraft und ersetzt damit die bisher gültige BattV. Ergänzend zu den bereits in der BattV geltenden Regelungen wurden gemäß der EU-Richtlinie Mindestanforderungen (Recyclingeffizienz) an Recyclingverfahren verankert. (Gesetz über das Inverkehrbringen 2009a)

5.7.2 Generelles zu Batterierecyclingverfahren

Prinzipiell können Lithium-Ionen-Batterien auf hydrometallurgischem Weg (nasschemische Prozesse bei niedrigen Temperaturen) oder auf pyrometallurgischem Weg (Einsatz von Schmelzaggregaten bei hohen Temperaturen) recycelt werden; auch eine Kombination aus pyro- und hydrometallurgischen Prozessschritten ist möglich. Die grundsätzlichen Vor- und Nachteile dieser beiden metallurgischen Verfahrensmöglichkeiten für das Recycling lithiumhaltiger Batterien werden in Tab. 5.9 aufgelistet.

Für Lithium-Ionen-Batterien müssen sowohl beim Transport als auch beim Recycling spezielle Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Der Grund liegt in der hohen Brand- bis hin zur Explosionsgefahr, hervorgerufen durch äußere oder innere Kurzschlüsse. Diese Gefahren sind zwar bei Lithium-Primärbatterien größer aufgrund des enthaltenen metallischen Lithiums, aber auch Lithium-Ionen-Batterien werden oftmals speziellen Behandlungsschritten zur „Deaktivierung“, d. h. Unschädlichmachung der Batteriezellen vor dem eigentlichen Recyclingprozess, unterzogen. (Miller und McLaughlin 2001; Krebs 2005)

Als Vorbehandlungsmethoden sind eine mechanische Aufbereitung und/oder eine Pyrolyse sinnvoll. Bei der mechanischen Aufbereitung werden die Batteriezellen mittels Brechern und Schreddern unter Schutzgas zerkleinert, in speziellen Fällen wird auch eine Tieftemperaturzerlegung durchgeführt. Anschließend findet eine Materialtrennung mittels klassischer Trenntechniken wie bspw. Magnetscheiden, Schweretrennen, Windsichten und Sieben statt. Während der Pyrolyse werden die Batteriezellen auf einige hundert Grad erhitzt. Dabei verflüchtigen oder verbrennen die organischen Batteriekomponenten und der Pyrolyserückstand wird weiter behandelt. Neben der Deaktivierung lithiumhaltiger Batteriezellen zur Minimierung der Gefahrenpotenziale verfolgen die Vorbehandlungen das weitere Ziel, weitestgehend einzelne, möglichst sortenreine Materialfraktionen zu gewinnen, die anschließend in getrennten Prozessschritten weiterverarbeitet werden können.

Tab. 5.9 Vor- und Nachteile des hydro- bzw. pyrometallurgischen Recyclings lithiumhaltiger Batterien. (In Anlehnung an Georgi-Maschler 2011)

	hydrometallurgischer Prozess	pyrometallurgischer Prozess
Vorteile	+ Wiedergewinnung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten sowie des Kohlenstoffs auch ohne Vorbehandlung möglich + geringe Abgasmengen + hohe Selektivität	+ Nutzung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten und des Kohlenstoffs als Reduktionsmittel bzw. als Energieträger + absatzfähige Metalle als Recyclingprodukte + hohe Raum-Zeit-Ausbeute
Nachteile	– Umgang mit großen Mengen an Chemikalien (Laugen, Säuren, Fällungsmittel usw.) – geringe Raum-Zeit-Ausbeute – große Mengen an Abwasser und Schlämmen	– große Mengen an Brennstoffen oder elektrischer Energie notwendig – aufwendige Abgasreinigung notwendig

Seit Inkrafttreten der EU-Batteriedirektive sind eine Reihe von Batterierecyclingverfahren entwickelt worden, die oftmals speziell auf die einzelnen chemischen Batteriesysteme zugeschnitten sind. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit, Lithium-Ionen-Batterieschrott als Sekundärrohstoff in die Primärgewinnungsrouten von Metallen wie Kobalt und Nickel oder in die Recyclingroute von Stahl einzubringen. Diese Möglichkeit zielt jedoch nur auf einzelne Metallinhalte ab, sodass die übrigen Batteriekomponenten verloren gehen und das Erreichen der derzeit vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Recyclingeffizienz von 50 Maß.-% für Lithium-Ionen-Batterien in Frage zu stellen ist.

5.7.3 Stand der Technik von Forschung und Entwicklung

Für Lithium-Ionen-Batterien sind in den letzten 15 Jahren eine Vielzahl von Recyclingverfahren im Labormaßstab veröffentlicht worden. Zudem sind eine Reihe von Patenten angemeldet worden, die sich ebenfalls hauptsächlich auf Untersuchungen im Labormaßstab stützen. (Patent div.) Diese Recyclingverfahren basieren überwiegend auf hydrometallurgischen Prozessschritten, also nasschemischen Lösungs- und Fällungsreaktionen, und konzentrieren sich hauptsächlich auf die Elektrodenmaterialien. Somit zielen alle Verfahren in erster Linie auf die Wiedergewinnung des Kobalts und des Lithiums ab. In einigen wenigen Veröffentlichungen ist ein zusätzlicher Pyrolyseschritt vorgesehen.

Um die Batterien laugen zu können, müssen sie zunächst aufgebrochen werden. Danach werden sie entweder direkt über Zeiträume zwischen 1–2, mitunter sogar über mehrere Stunden hinweg bei Temperaturen von maximal 100 °C und teilweise unter Einsatz eines Rührers gelaugt oder es findet vor der Laugung eine Materialtrennung mittels Sieben und Magnetscheiden statt, sodass nur die anfallende Feinfraktion der Laugung unterzogen wird. Letztere Verfahrensweise hat den Vorteil, dass die Laugungszeit erheblich, d. h. bis auf ca. 10 Minuten, verkürzt werden kann. Den restlichen Materialfraktionen, die hauptsächlich die metallischen Batteriekomponenten enthalten, wird zumeist keine große Beachtung geschenkt. Hier wird entweder auf den Verkauf an Metallrecyclingunternehmen verwiesen oder die gesamte Restfraktion wird einer Pyrolyse unterzogen, um nicht-metallische Bestandteile zu verbrennen. Der Pyrolyserest, der teilweise sogar mit den Sammelbegriffen „Metal Alloy“ oder „Steel“ bezeichnet wird, ist wiederum für den Verkauf an Metallrecyclingunternehmen vorgesehen. (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001; Shin et al. 2005; Nan et al. 2006)

Da sich LiCoO_2 kaum in herkömmlichen Lösungsmitteln löst, sind verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung geeigneter Lösungsmittel durchgeführt worden. Als Laugungsmedien kommen bspw. Salpetersäure (HNO_3), Oxalsäure ($\text{C}_2\text{O}_4\text{H}_2$), Salzsäure (HCl), Hydroxylaminhydrochlorid ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$), schweflige Säure (H_2SO_3) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) zum Einsatz, teilweise auch unter Zugabe von Wasserstoffperoxid (H_2O_2). Die Untersuchungen haben ergeben, dass Mischungen aus Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid sowie Salzsäure oder Salpetersäure die besten Laugungsergebnisse liefern. (Sohn et al. 2006; Zhang et al. 1998)

Nach der Laugung findet eine Filtration zur Abtrennung der unlöslichen Bestandteile statt. Der Filtrerrückstand enthält alle metallischen Batteriekomponenten, die während der Laugung nicht aufgelöst werden, und soll entweder direkt weiterverkauft oder vorher noch einem Pyrolyseschritt zur Entfernung von Kohlenstoff und organischen Komponenten unterzogen werden. Es besteht somit kein Unterschied zu der Verfahrensweise, bei der bereits vor der Laugung eine Materialtrennung stattfindet. (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001)

Für die Lauge sind zwei verschiedene Weiterbehandlungsverfahren untersucht worden. Der erste Verfahrensvorschlag sieht eine direkte Zugabe eines Fällungsreagenz zur Ausfällung einer Kobaltverbindung vor, bspw. Natronlauge (NaOH) zum Ausfällen von Kobalhydroxid ($\text{Co}(\text{OH})_2$). Dieses wird abfiltriert, bevor ein zweites Fällungsmittel, bspw. Natriumkarbonat (Na_2CO_3), zum Ausfällen einer Lithiumverbindung, zumeist Lithiumkarbonat (Li_2CO_3), zugegeben wird. (Castillo et al. 2002; Contestabile et al. 2001; Zhang et al. 1998; Afonso 2006; Hurtado 2005; Sohn 2003)

Der zweite Verfahrensvorschlag zielt auf die metallische Gewinnung von Kobalt und evtl. enthaltenem Nickel durch eine Gewinnungselektrolyse ab. Um in der Elektrolyse störende Begleitelemente aus der Hauptlösung zu entfernen, wird eine Solvent-Extraktion durchgeführt. Dazu werden gängige Solvent-Extraktionsmittel wie Cyanex 272 (Bis-2,4,4-Trimethylpentyl-Phosphinsäure), D2EHPA (Bis-2-Ethylhexyl-Phosphorsäure) oder PC-88A (2-Ethylhexyl-Phosphorsäure-Mono-2-Ethylhexyl-Ester) eingesetzt. (Nan et al. 2006; Zhang et al. 1998; Dorella und Mansur 2007; Lupi und Pasquali 2003; Lupi et al. 2005; Rosenberg 2004; Ellar und Liwat 1987) Auf diese Weise verbleibt das Lithium in der Hauptlösung und kann später als Lithiumverbindung ausgefällt werden. Wenn der Kupfergehalt und/oder der Nickelgehalt hoch sind, wird vor der Kobalt-Solvent-Extraktion noch eine Kupfer- bzw. Nickel-Solvent-Extraktion durchgeführt.

Besonders interessante Recyclingüberlegungen finden sich in Untersuchungen zur direkten Herstellung von neuen aktiven Kathodenmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterieschrott. Durch Laugen der Elektrodenmaterialien wird eine Ausgangslösung erstellt, die je nach aktivem Kathodenmaterial Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan enthält. Dafür wird das Elektrodenmaterial wie in den bereits beschriebenen Verfahren durch kombinierte mechanische Aufbereitungs- und Pyrolyseschritte separiert. Der Ausgangslösung wird dann zur gezielten Einstellung des Stoffmengenverhältnisses von Lithium zu Kobalt eine Lithiumnitrat-Lösung (LiNO_3) zugegeben. Aus der so hergestellten Prekursor-Lösung wird anschließend durch Zugabe von Zitronensäure eine gelartige Substanz erzeugt, die bspw. zur Herstellung von LiCoO_2 bei einer Temperatur von 950 °C über 24 Stunden kalziniert wird (vgl. Lee und Rhee 2007; Li et al. 2007).

Eine weitere Möglichkeit stellt die Trennung der gesamten Kathoden, bestehend aus LiCoO_2 , Binder- und Kohlenstoffkomponenten sowie Aluminiumfolie, von den Lithium-Ionen-Altbatterien dar. Die kompletten Kathoden werden anschließend unter Verwendung einer fünfmolaren Lithiumhydroxidlösung (LiOH) als Laugungsmittel in einem Autoklaven separat gelaugt. Das Verfahren basiert auf einem einzigen Lösungs- und Fällungsschritt. Durch gezielte Einstellung der Prozessparameter kann direkt nach der Laugung

wieder neues Kathodenmaterial ausgefällt werden, das neben LiCoO_2 bis zu 13,7 Mass.-% an Verunreinigungen enthält. Jedoch soll es sich bei diesen Verunreinigungen hauptsächlich um Binder- und Kohlenstoffkomponenten handeln, die dem LiCoO_2 vor dem Aufbringen auf die Aluminiumfolie ohnehin wieder beigefügt werden müssen. Der Prozess wird bei einer Temperatur von 200 °C über einen Zeitraum von 20 Stunden durchgeführt (vgl. Kim et al. 2003).

Alle Untersuchungen zur direkten Herstellung von Elektrodenmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterieschrott liefern aktive Kathodenmaterialien mit brauchbaren elektrochemischen Eigenschaften für den erneuten Einsatz in Batterien. Es sind aber nicht die gleichen guten Eigenschaften von herkömmlichen kommerziellen Kathodenmaterialien erreicht worden. Zudem fokussieren die Untersuchungen nur auf die Wiedergewinnung der Kathodenmaterialien, d. h., alle anderen Batteriekomponenten bleiben unberücksichtigt.

5.7.4 Stand der Technik industrieller Recyclingverfahren

Industrielle Recyclingverfahren für lithiumhaltige Batterien sind in erster Linie in Nordamerika, Europa und Japan anzutreffen, wo vom Gesetzgeber vorgeschriebene bzw. organisierte Rücknahme- und Entsorgungssysteme bestehen, welche die notwendige Grundlage für ein umweltgerechtes Batterierecycling darstellen. Das Fehlen dieser organisierten Systeme führt bspw. in China und Indien zu einer speziellen Form des Batterierecyclings. Dort werden Altbatterien von der ärmeren Bevölkerung in Hinterhöfen manuell aufgebrochen und in einzelne Materialfraktionen separiert (s. Abb. 5.44).

Die Materialfraktionen werden an Metallschrotthändler weiterverkauft oder z. T. sogar in selbst konstruierten kleinen Schmelzaggregaten eingeschmolzen, da die umgeschmolzenen Metalle höhere Erlöse erzielen. Diese Form des Batterierecyclings ist nicht nur aus



Abb. 5.44 Beispiel für händisches Batterierecycling in China (*links*) und Indien (*rechts*). (Quelle: BAN 2009, Süddeutsche Zeitung 2007)

umwelttechnischer Sicht problematisch, sondern auch in hohem Maß gesundheitsgefährdend für die Menschen sowie ressourcenineffizient.

Im Folgenden werden Prozessbeispiele für industrielle Lithium-Ionen-Batterierecyclingverfahren der Unternehmen Batrec, Toxco, Inmetco, Xstrata (ehemals Falconbridge) und Umicore als typische Vertreter ihrer Verfahrenskategorien beschrieben. Neben diesen Prozessbeispielen gibt es eine Reihe weiterer Unternehmen, die sich mit dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien befassen. Dies sind u. a. Recupyl (Frankreich), S.N.A.M. (Frankreich), AEA Technology (Großbritannien), Metal-Tech (Israel), Sony-Sumitomo (Japan) und Onto Technology (USA) (vgl. Lain 2001; Lupi et al. 2005; Rosenberg 2004; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Rosenberg 2001; Recupyl S.A.S. 2009; European Commission 2009; Tedjar 2003, 2006, 2008; S.N.A.M. 2009; David 1999; Wiaux 2002; Sloop 2008; Onto Technology LLC 2009; Butler 2004). Alle Recyclingverfahren dieser Unternehmen lassen sich in die hier vorgestellten Verfahrenskategorien einordnen, weshalb auf deren detaillierte Prozessbeschreibung verzichtet wird.

5.7.4.1 Batrec-Prozess als Beispiel für mechanische Aufbereitung von Batterieschrott

Die zur Veolia-Gruppe gehörende Batrec Industrie AG in Wimmis (Schweiz) verarbeitet als einziges Batterierecyclingunternehmen in der Schweiz alle Arten von Primärbatterien, quecksilberhaltige Abfälle und Altkatalysatoren. Dementsprechend sind die Hauptrecyclingprodukte eine Ferromanganlegierung, Zinkmetall und Quecksilber. Des Weiteren verfügt Batrec über eine spezielle Anlage zur mechanischen Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien unterschiedlichster Zellengrößen. Die Batterien werden über eine je nach Anforderung beheiz- oder kühlbare Förderschnecke in die Anlage eingetragen und dort zur Minimierung der Brand- und Explosionsgefahr unter CO₂-Atmosphäre aufgebrochen. Batrec bezeichnet dies als „Neutralisation“ der Batterien. Der leicht flüchtige Elektrolyt verdampft währenddessen und wird als nicht weiterverwertbares Kondensat aufgefangen. Anschließend findet unter Luftatmosphäre eine Trennung der einzelnen Batteriekomponenten in zwei Metallfraktionen, eine Plastikfraktion und eine Feinfraktion statt, die das kobalt- und lithiumhaltige Elektrodenmaterial beinhaltet. Die einzelnen Metallfraktionen (Nichteisenmetalle und Nickel-Stahl) werden an Recyclingunternehmen der Metallindustrie abgegeben. Die Feinfraktion wird an die Kobalt- und Nickelhersteller Xstrata und Umicore verkauft. Die Plastikfraktion wird z. T. dem Pyrolyseprozess für Primärbatterien zugeführt und das Kondensat in der eigenen Abwasseraufbereitungsanlage weiterbehandelt. Den Aufbereitungsprozess sowie die dabei entstehenden Materialfraktionen zeigt Abb. 5.45. Zurzeit verarbeitet die Anlage ca. 300 t lithiumhaltige Batterien pro Jahr, wobei auch Lithium-Primärbatterien in geringeren Mengen dem Prozess zugeführt werden können (vgl. Krebs 2005; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Batrec Industrie AG 2009; Metallurgische Exkursion des IME 2008; Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern 2003; Wissmann 2008; Krebs 2002, 2003, 2006).



Abb. 5.45 Mechanische Aufbereitung bei Batrec. (Quelle: Batrec Industrie AG 2009)

5.7.4.2 Toxco-Prozess als Beispiel für hydrometallurgisches Batterierecycling

In Nordamerika betreibt das zur Kinsbursky Brothers Inc. gehörende Unternehmen Toxco Inc., British Columbia, seit 1993 einen industriellen Recyclingprozess für Lithiumbatterien, der auf einer Tieftemperaturzerlegung basiert und ursprünglich für Lithium-Primärbatterien entwickelt worden ist.

Das Verfahren eignet sich für alle Typen von lithiumhaltigen Batterien, d. h. sowohl für alle unterschiedlichen chemischen Zellsysteme als auch für alle Batteriegrößen von klassischen Gerätebatterieformaten bis hin zu Spezialbatterien für militärische Anwendungen mit Gewichten von über 250 kg. Dabei werden laut Toxco Recyclingeffizienzen von bis zu 80 % realisiert. Zur Vermeidung von Unfällen werden ca. 90 % der Arbeitsschritte ferngesteuert durchgeführt.

Die angelieferten Lithiumbatterien werden zunächst nach System und Größe sortiert und anschließend in Betonbunkern bis zur Weiterverarbeitung sicher gelagert. Im Fall von

Lithium-Primärbatterien werden die Batterien zur Herabsetzung der Reaktionsfähigkeit des metallischen Lithiums und anderer Bestandteile in ein Bad mit flüssigem Argon ($T_b = -186\text{ °C}$) oder Stickstoff ($T_b = -196\text{ °C}$) eingetaucht, je nach Größe bis zu 24 Stunden. Das Aufbrechen der Batterien findet in einer Natriumhydroxid- oder Lithiumhydroxid-Lösung (NaOH bzw. LiOH) statt, um saure Komponenten zu neutralisieren und die Wasserstoffbildung zu minimieren. Je nach Größe werden bis zu zwei weitere Zerkleinerungs- und Reaktionsstufen durchgeführt, um eine vollständige Reaktion der reaktiven Bestandteile zu gewährleisten. Der bei der Reaktion entstehende Wasserstoff reagiert kontrolliert an der Badoberfläche mit aufschwimmendem Lithium. Im Fall von Lithium-Ionen-Batterien findet direkt nach dem Aufbrechen eine Materialtrennung statt, wobei eine Leichtfraktion („Li-Ion-Fluff“), ein Kupfer-Kobalt-Produkt sowie ein lithium- und kobalthaltiger Schlamm anfallen. Es ist anzunehmen, dass es sich bei dem Kupfer-Kobalt-Produkt um Kupfer-Elektrodenfolien mit anhaftendem Elektrodenmaterial handelt. Aus dem Schlamm wird das Lithium herausgelöst und die Lösung in die Aufarbeitungsrouten für Lithium-Primärbatterien gegeben, wo später ein Lithiumkarbonat mit einer Reinheit von 90–97 % ausgefällt wird. Der verbleibende Filterkuchen („Cobalt Filter Cake“) enthält das Kobalt und wird zur Gewinnung einer Kobaltverbindung mit einer Reinheit von 99 % getrennt weiterverarbeitet. Wie dies geschieht, ist nicht bekannt; es ist jedoch wahrscheinlich, dass es sich dabei ebenfalls um gezielte Lösungs- und Fällungsschritte handelt. Das gewonnene Lithiumkarbonat kann direkt an die Batterieindustrie verkauft werden, was dem Ziel eines Closed-Loop-Recyclings sehr nahe kommt. Beispielsweise produziert das Tochterunternehmen Lithchem International seit 1996 aus dem von Toxco wiedergewonnenen Lithiumkarbonat u. a. Salze und Elektrolyte zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien. Im Prozessverlauf anfallende Metallfraktionen werden an Metallrecyclingunternehmen abgegeben (vgl. Miller und McLaughlin 2001; Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Gavinet 1999; Coy 2001, 2006).

5.7.4.3 Inmetco-Prozess als Beispiel für pyrometallurgisches Batterierecycling

Das US-amerikanische Unternehmen Inmetco Inc. in Ellwood City (Pennsylvania) ist ein Tochterunternehmen von Vale Inco und hat sich hauptsächlich auf das Recycling von Reststoffen aus der Stahlproduktion (Krätzen, Walzzunder, Flugstäube usw.) zur Herstellung von Direct Reduced Iron (DRI) in einem Drehherdofen spezialisiert (Prozesstemperatur ca. 1350 °C). Daneben verarbeitet Inmetco auch nickel- und chromhaltige Reststoffe aus der Galvanikindustrie. Seit 1995 betreibt Inmetco eine Anlage zum Recycling von NiCd-Batterien. Heute werden neben NiCd-Batterien auch quecksilberfreie Zink-Kohle-Batterien sowie NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien recycelt. Während das Recycling von NiCd-Batterien in einer speziellen Anlage stattfindet, werden Zink-Kohle-, NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien dem DRI-Hauptrecyclingprozess an geeigneten Stellen zugeführt. Zink-Kohle- und NiMH-Batterien können zusammen mit den Reststoffen aus der Stahlproduktion direkt im Drehherdofen eingesetzt werden. Das entstandene DRI wird anschließend in einem Lichtbogenofen (LBO) zur Herstellung einer NiCoCrFe-Legierung



Abb. 5.46 Legierungsabstich aus dem LBO bei Inmetco. (Quelle: Inmetco Inc. 2009)

eingeschmolzen (s. Abb. 5.46). Das Kobalt stammt aus Lithium-Ionen-Batterieschrott, der in den LBO zuchargiert wird. Das Verfahren zielt somit nur auf die Wiedergewinnung der Kobalt- und Nickelinhalte aus den Lithium-Ionen-Batterien ab. Alle organischen, unedlen und leicht flüchtigen Bestandteile dienen entweder als Reduktionsmittel oder werden verschlackt bzw. über den Abgasstrom ausgetragen. Insofern stellt der Inmetco-Prozess kein speziell auf Lithium-Ionen-Batterien zugeschnittenes Recyclingverfahren dar (vgl. Espinosa et al. 2004; Rentz et al. 2001; Inmetco Inc. 2009; Hardies 2008; Thompson 2004).

5.7.4.4 Xstrata-Prozess als Beispiel für Batterierecycling durch Einbringen in Primärgewinnungsroute

Lithium-Ionen-Batterien können auch durch Einbringen in die Primärgewinnungsroute von Kobalt und Nickel recycelt werden. Da diese beiden Metalle zumeist im Erz vergesellschaftet sind, ist deren Gewinnung sehr eng miteinander verknüpft. Durch die Übernahme von Falconbridge Ltd. im Jahr 2006 verfolgt der Kobalt- und Nickelhersteller Xstrata Plc. seit 2001 das Prinzip, kobalt- und nickelhaltigen Batterieschrott sowie Produktionsschrotte von Elektrodenmaterialherstellern in die einzelnen Prozessstufen seiner Primärgewinnungsroute von Kobalt und Nickel einzubringen. Laut Xstrata besteht ein großer Vorteil dieser Recyclingmethode darin, dass die Chargierung von wertmetallhaltigem, aber schwefelfreiem Batterieschrott im Vergleich zum Erz eine Energieeinsparung mit sich bringt, da der Schwefelanteil im Abgas deutlich herabgesetzt wird. Dadurch kann die Abgasbehandlung minimiert werden. Ebenfalls gibt Xstrata eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 75 % durch den Einsatz von kobalthaltigen Sekundärrohstoffen im Vergleich zum Erz an. Bis 2008 ist der Batterieschrott je nach Zusammensetzung in den Röster, in den Elektroöfen oder in den

Peirce-Smith-Konverter chargiert worden. Durch das direkte Chargieren der kompletten Batterien ist jedoch ebenfalls eine große Feuchtemenge über den Elektrolyten in den Prozess eingebracht worden, was neben Energieverlusten zum Zusetzen bzw. Verkleben von Anlagenteilen geführt und folglich die Zuchargierung von Batterien massenmäßig begrenzt hat. Seit 2008 betreibt Xstrata daher einen Drehrohrofen-Prozess zur Vorbehandlung von kobalt- und nickelhaltigen Sekundärrohstoffen bei Temperaturen von 750–900 °C. Der trockene Materialaustrag aus dem Drehrohrofen wird anschließend zusammen mit den Primärrohstoffen aus dem Röster in den LBO chargiert. Entsprechend zielt diese Recyclingmethode in erster Linie auf die Kobalt- und Nickelinhalte der Batterien ab. Alle übrigen Materialinhalte werden entweder energetisch verwertet oder dienen als Reduktionsmittel und werden verschlackt bzw. über den Abgasstrom ausgetragen. Erzeugt wird eine kobalt- und nickelhaltige Steinphase, die im weiteren Prozessverlauf granuliert und einem Laugungsschritt sowie einer Solvent-Extraktion unterzogen wird. Mittels Gewinnungselektrolysen wird letztendlich reines Kobalt- bzw. Nickelmetall erzeugt. Die Gewinnung der Steinphase erfolgt in Kanada (Sudbury), während die Elektrolyse zur Metallgewinnung in Norwegen (Kristiansand) stattfindet. Bis 2008 hat das Unternehmen eine Recyclingeffizienz von mindestens 60 Mass.-% angegeben, jedoch unter Miteinberechnung der chemisch umgesetzten (teilweise verschlackten) und daher nicht wiedergewonnenen unedlen Elemente Eisen, Aluminium und Kohlenstoff. Das wird begründet durch die für den Prozess erforderlichen reduzierenden Eigenschaften dieser Elemente (vgl. Henrion 2004, 2008a, b; Tollinsky 2009). Laut der EU-Batteriedirektive gelten diese Anteile aber nicht als recycelt und sind somit irrelevant für die Berechnung der Recyclingeffizienz.

5.7.4.5 Umicore-Prozess als Beispiel für kombiniertes hydro- und pyrometallurgisches Batterierecycling

Umicore hat im September 2011 eine Pilotanlage zum Recycling von Lithium-Ionen-, Lithium-Polymer- und NiMH-Batterien in Hoboken, Belgien, eingeweiht. Diese Anlage ist für 7000 t Batterieschrotte ausgelegt.

In Hoboken werden ganze Zellen in einen pyrometallurgischen Ofen chargiert und eingeschmolzen. Dabei wird eine CoNiCuFe-Metalllegierung erzeugt. Lithium, Aluminium, der Elektrolyt, der Separator und der Grafit verbrennen bzw. werden teilweise als Reduktionsmittel genutzt, reichern sich in der Schlacke an oder verlassen den Prozess mit dem Abgas. Die gewonnene Schlacke kann als Baumaterial im Straßenbau veräußert werden. Die CoNiCuFe-Legierung wird granuliert und im Umicore-Werk in Olen, Belgien, hydro-metallurgisch weiterverarbeitet. Das Granulat wird gelaugt. Die gewonnene NiCo-Lösung wird gereinigt, Co und Ni durch ein Solvent-Extraktionsverfahren getrennt und als hochreine Zwischenprodukte gewonnen. Das so gewonnene Kobaltoxid wird dann im Umicore-Werk in Cheonan, Südkorea, als Ausgangsmaterial zur Herstellung von neuem aktivem Kathodenmaterial (LiCoO_2) verwendet. Die nachfolgende Abb. 5.47 zeigt schematisch den Umicore-Recyclingprozess. Laut den Aussagen von Umicore kann so eine Recyclingeffizienz von 64,6 % erreicht werden (Umicore 2010).

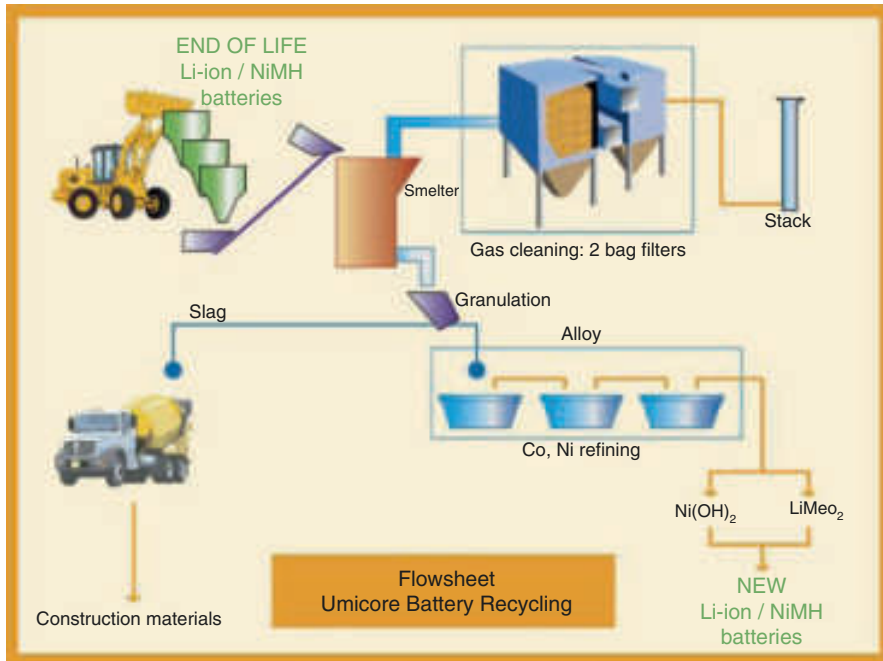


Abb. 5.47 Schematische Darstellung des Umicore-Recyclingprozesses. (Quelle: Umicore 2010)

5.7.4.6 IME-ACCUREC-Verfahren als Beispiel für eine Kombination aus mechanischer, hydro- und pyrometallurgischer Aufbereitung

Am IME – Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen University wurde im Rahmen eines BMBF-geförderten Verbundforschungsprojektes („Rückgewinnung der Rohstoffe aus Lithium-Ionen-Akkumulatoren“; Förderkennzeichen 01RW0404) ein alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien entwickelt, das bereits erfolgreich im Technikums-Maßstab getestet wurde. Das Verfahren zielt darauf ab, sowohl die Metallgehalte weitestgehend in metallischer Form als auch die organischen Komponenten wiederzugewinnen. Dazu wurden verschiedene Aufbereitungstechniken sowie die Vorteile hydro- und pyrometallurgischer Prozessschritte kombiniert.

Im Unterschied zu den vorgestellten rein pyrometallurgischen Recyclingverfahren werden die Batterien vor dem Einschmelzen aufgebrochen, zerkleinert und die einzelnen Batteriekomponenten weitestgehend voneinander getrennt. Dies ermöglicht trotz der pyrometallurgischen Behandlung die Wiedergewinnung der unedlen und organischen Komponenten. Zudem soll das Verfahren eine Wiedergewinnungsmöglichkeit für Lithium bieten. Das zugehörige Prozessfließbild zeigt Abb. 5.48.

Die Hauptrecyclingprodukte sind eine im Elektrolichtbogenofen erschmolzene Kobalt-Mangan-Legierung sowie ein Lithium-Konzentrat (Lithium-angereicherter Flugstaub). Die Metalllegierung kann als Vorlegierung für Superlegierungen auf Kobaltbasis eingesetzt werden und ist somit direkt absetzbar. Aus dem Lithium-Konzentrat wird

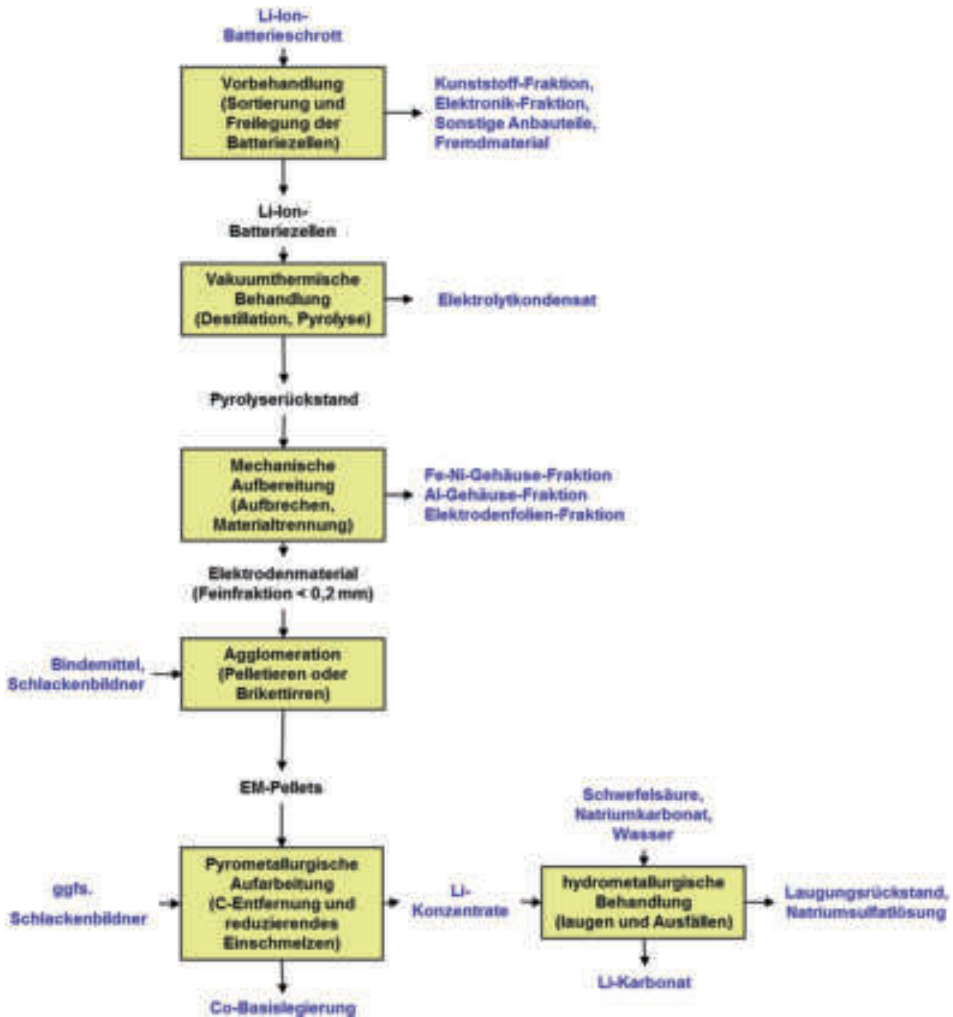


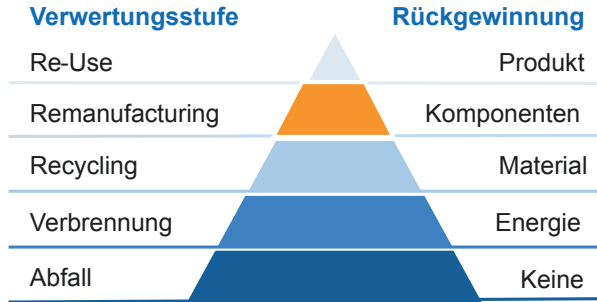
Abb. 5.48 Alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. (Quelle: Georgi-Maschler 2011)

mittels einer hydrometallurgischen Behandlung ein Lithium-Karbonat mit einer Reinheit größer 99 % gewonnen.

5.8 Remanufacturing als ergänzender Teil der Wertschöpfung

Im Rahmen des Remanufacturing wird die Aufarbeitung eines gebrauchten Gerätes auf einen neuwertigen Qualitätsstandard forciert (Walther 2010). Es stellt ein besonders nachhaltiges Konzept zur Steigerung der Rohstoff-, Material- und Ressourceneffizienz dar.

Abb. 5.49 Verwertungsstufen in Anlehnung an (Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24 2012)



In der Abfallhierarchie (Abb. 5.49 links) steht das Remanufacturing auf der zweithöchsten Verwertungsstufe und gilt daher als besonders erstrebenswert. Insbesondere bei der Verwendung von knappen Ressourcen ist das Potenzial enorm. Neben ökologischen, sind somit auch strategische und ökonomische Interessen Treiber für das Remanufacturing (Benory et al. 2014).

Bei vielen Produkten wird Remanufacturing bereits heute umgesetzt, insbesondere bei investitionsintensiven Gütern wie Industriemaschinen und -werkzeugen, in der Luft- und Raumfahrt oder im Anlagenbau (Gray und Charter 2007). Im Gegensatz zu den Begriffen Refurbishing oder Retrofit, bei denen einzelne Komponenten ausgetauscht, aktualisiert oder instandgesetzt werden, wird beim Remanufacturing das komplette Produkt betrachtet (s. Abb. 5.50). Der klassische Remanufacturingprozess kann dabei generell in fünf Schritte gegliedert werden. Im ersten Schritt wird das gebrauchte Endprodukt demontiert und seine Bestandteile gereinigt. Die einzelnen Teile und Komponenten werden anschließend hinsichtlich möglicher Defekte und Schwachstellen inspiziert. Im dritten Schritt werden die Bauteile wiederaufbereitet und im Bedarfsfall durch neue ersetzt. Die neuwertigen Bauteile werden im vierten Schritt wieder in ein Endprodukt verbaut. Dabei ist sowohl die Wiederverwendung der Teile und Komponenten im ursprünglichen Endprodukt zur Verlängerung der Nutzungsdauer, als auch die Wiederverwendung in gänzlich anderen Endprodukten möglich. Abschließend erfolgt im fünften Schritt eine funktionsprüfung des Endproduktes.

Bislang findet in der Automobilindustrie, im Bezug auf das Gesamtfahrzeug nur Refurbishing auf Komponentenebene statt, d. h. das Fahrzeug wird unter Austausch oder Reparatur von Verschleißteilen wiederverwendet. Beispiele stellen Motoren, Anlasser und Lichtmaschinen, Kupplungen oder Kraftfahrzeug-Elektronik dar (Bullinger et al. 2009). Am Ende des Lebenszyklus findet zudem bei einzelnen Komponenten eine Wiederverwendung statt. Im Gegensatz zu den aufgeführten Komponenten ist das Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien bislang noch nicht Stand der Technik. Als Grund ist hier unter anderem die fehlende Berücksichtigung der Demontierbarkeit bei der Konzeption von Traktionsbatterien zu nennen. Weitere Gründe können design-, umwelt- oder sicherheits-technische Aspekte darstellen. Demgegenüber stehen aber große Potenziale durch ein Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batteriepacks. Diese liegen zum Beispiel in der Erschließung von neuen Geschäftsfeldern durch das Veräußern gebrauchter und wieder aufbereiteter Komponenten, einer nachhaltigen und emissionsarmen Produktion

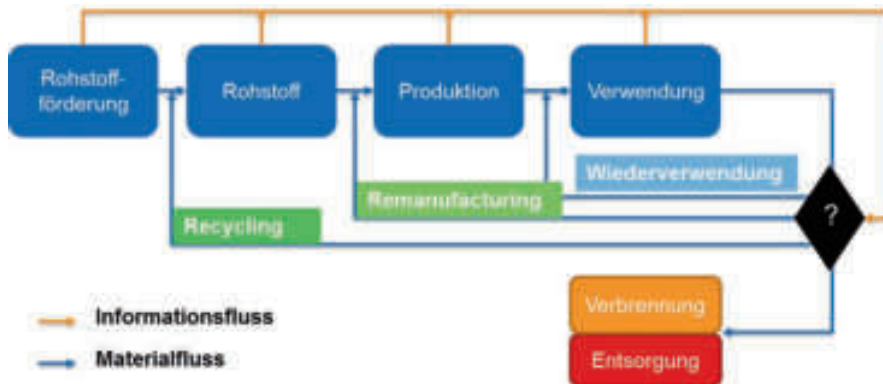


Abb. 5.50 Material- und Informationsfluss während des Lebenszyklus im Fahrzeugs (Ke et al. 2011)

mit einem verringertem Energie- und Ressourcenbedarf, in der Wiederverwendung oder in der Verlängerung der Nutzungsdauer durch den Austausch defekter Komponenten. Zudem lassen sich gezielt Marketingmaßnahmen aus dem Produktnutzungsverhalten durch eine geeignete Traceability ableiten und genauere Nachfrageprognosen für zukünftige Produkte generieren. Neben den aufgeführten Potenzialen, bietet das Remanufacturing dem Hersteller auch die Möglichkeiten, die gesetzlichen Anforderungen an Batterien zu erfüllen. Nach § 23 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) sind Entwickler, Hersteller und Vertrieber von Erzeugnissen dazu verpflichtet, Produkte möglichst so zu gestalten, dass bei ihrer Herstellung und ihrem Gebrauch Abfälle vermindert werden. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass nach ihrer Nutzungsphase entstandene Abfälle umweltverträglich verwertet oder beseitigt werden. Hierdurch müssen die Hersteller von Lithium-Ionen-Batterien dafür Sorge tragen, dass ihre Batterien eine möglichst hohe Lebenserwartung, eine mehrfache Verwendbarkeit und die Wiedergewinnung von Rohstoffen (Recycling) zulassen. Dabei kommt für Traktionsbatterien zusätzlich die Altfahrzeugverordnung zu tragen, die eine Wiederverwendung und Wiederverwertung von mind. 95 Gewichtsprozent bzw. eine Wiederverwendung und stoffliche Verwertung von mind. 85 Gewichtsprozent seit dem 01.01.2015 fordert. Darüber hinaus wird in § 5 des Batteriegesetzes (Gesetz über das Inverkehrbringen 2009b) die Rücknahmepflicht der Hersteller geregelt. Danach sind Hersteller dazu verpflichtet, die produzierten Batterien vom Vertrieber unentgeltlich zurückzunehmen und Wiederverwerten bzw. zu beseitigen. Neben den innerdeutschen Gesetzen müssen Hersteller verschiedene EU-Verordnungen zur stofflichen Verwertung und Recyclingeffizienz von Batterien einhalten (siehe u. a. (EU) Nr. 493/2012, Richtlinie 2006/66/EG). Neben den aufgeführten Vorteilen des Remanufacturings von Lithium-Ionen-Batterien für die Produzenten, weist dieses auch viele Vorteile für Kunden auf. Zum einen steigt die ökologische Wertigkeit des Produktes und zum anderen sind Kostensenkungspotenziale durch eine längere Nutzungsdauer oder durch die Wiederverwendung einzelner Komponenten realisierbar.

5.8.1 Konzeptansätze zum Remanufacturing von Lithium-Ionen-Batterien

Der theoretische Restwert von genutzten Batterien bei einer Restkapazität von 80 % liegt bei ca. 70–75 % des Neupreises. Insbesondere die Zellen aber auch die Peripherie wie Gehäuse, Kühlung und Batteriemanagementsystem besitzen einen hohen Restwert und bieten sich daher für entsprechende Remanufacturingkonzepte an (Kampker et al. 2016a).

Second-life-Konzepte und Anwendungen in z. B. stationären Energiespeichern berücksichtigen diese hohen Restwerte bereits, bedingen aber aufgrund von sehr unterschiedlichen Anforderungen und Betriebsbedingungen meist eine komplette Anpassung der entsprechenden Batteriearchitektur. Daher werden die Potenziale im Second-use in anwendungsfremden Applikationen wie als Hausspeicher sehr unterschiedlich wahrgenommen.

Typischerweise bietet der After-Sales Markt ein großes Potenzial für den Einsatz von Remanufacturing-Konzepten. Berücksichtigt man die sich sehr schnell veränderende Batterietechnologie steht die Ersatzteilversorgung vor neuen Herausforderungen. Insbesondere für zukünftige Youngtimer stellt sich die Frage, wie eine Nachserienversorgung von Batterieersatzteilen realisiert werden kann. Geeignete Remanufacturing-Lösungen können hier die Lücke zwischen Serienproduktion und Nachserienversorgung schließen und auch in Zukunft bei neuen Batterietechnologien die entsprechenden Erstatzteile bereitstellen (Kampker et al. 2016a).

Darüber hinaus variiert die Lebensdauer der einzelnen Zellen im Batteriepack und die Gesamtkapazität des Packs kann so negativ beeinflusst werden. Austauschbare Zellen oder Module, welche durch ein remanufacturingfähiges Design ermöglicht werden, können so die Lebensdauer und Kapazität der Batteriepacks nachhaltig erhöhen und wirken so dem Reichweitenverlust durch Alterung entgegen. Noch weiter gedacht können durch bessere Zelltechnologien und geeignete modulare Schnittstellen Updates für die Batteriepacks ermöglicht werden. So könnte die mögliche Reichweite bei zu erwartenden Kapazitätsteigerungen sogar nachträglich erhöht werden. Schließlich wären auch modulare Reichweitenupdates bei sich ändernden persönlichen Reichweitenanforderungen durch die entsprechende Auslegung für ein Remanufacturing denkbar.

5.8.2 Herausforderungen des Remanufacturing in der Batterie

Für ein erfolgreiches Remanufacturing müssen verschiedene technische Fragestellungen gelöst werden. Bestehende Forschungsarbeiten definieren produktseitige Voraussetzungen, die dieses Vorgehen ermöglichen. So führt Sundin (2004), als Befähiger für Remanufacturing, die Fertigbarkeit eines Produktes in einer Serienumgebung, den Aufbau des Produktes aus austauschbaren Komponenten oder das Ausbleiben von disruptiven Technologiewechsels an (Sundin 2004). Weiter zeigen Lage und Filho (2012) Herausforderungen in der Produktionsplanung und -steuerung auf, welche es im Rahmen des

Remanufacturings zu adressieren gilt. Diese zeigen sich beispielsweise in dem unsicheren Zeitpunkt und der unsicheren Menge der Rückläuferprodukte. Gelingt es nicht diesen Rückfluss mit der Nachfrage abzugleichen, kann es zu hohen Lagerbeständen kommen. Darüber hinaus muss eine eindeutige Rückverfolgbarkeit der Batteriebestandteile gewährleistet werden. Dies führt zu der Notwendigkeit eines ausgereiften Reverse-Logistik-Netzwerks, um eine etwaige Kollektions-Lücke zu schließen und die Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Schließlich ergibt sich eine weitere Herausforderung in den variierenden Zuständen der rückfließenden Produkte, sodass angepasste Aufbereitungs- und Montageprozesse erforderlich werden (Lage und Filho 2012). Zudem muss das Produkt eine Integration neuer Komponenten und somit die Demontage ermöglicht werden. Für eine einfache Demontage sollten die entsprechenden Teile und Komponenten durch lösbare Verbindungen mit dem Gesamtsystem verbunden sein. Diese lösbaren Verbindungen müssen bereits im Konstruktionsprozess berücksichtigt und ohne Zerstörung der jeweiligen Komponenten gelöst werden können. Zu den lösbaren Verbindungen zählen unter anderem Schrauben, Stift- und Bolzenverbindungen und Clipse. Insbesondere bei Traktionsbatterien sind hierfür noch einige weitere Herausforderungen zu bewältigen, da diese aktuell nicht speziell auf eine Demontage ausgelegt werden. Beispielsweise sind die Packgehäuse nicht auf Demontageschritte ausgelegt oder die Zellkontaktierung im Modul erfolgt durch nicht lösbare Verbindungen. In Anbetracht des Preisverfalls von Lithium-Ionen-Batteriezellen ist eine wirtschaftliche Demontage der Komponenten entscheidend, um die wiederaufbereiteten Komponenten nicht teurer zu gestalten als neue. Hierdurch ergibt sich die zusätzliche Herausforderung den Demontagevorgang der Batterien weitestgehend zu automatisieren. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Designs auf Pack-, Modul- und Zellebene wird eine automatische Demontage ein hohes Hindernis darstellen.

Voraussetzungen für das Remanufacturing ist also ein modularer Aufbau der Batteriepacks mit standardisierten Schnittstellen, die für die Integration von technologischen Weiterentwicklungen ausgelegt sind. Auch die Anbindung ans Fahrzeug muss modular und mit einheitlichen Schnittstellen gestaltet werden, um einen nachträglichen Austausch bei neuen Batterietechnologien zu ermöglichen. Um darüber hinaus bereits in der Produktion das Potenzial des Remanufacturing gänzlich auszuschöpfen, kann bei der Auslegung der Batterie bereits die Nutzungsdauer Berücksichtigung finden. So werden die jeweiligen Komponenten entsprechend auf eine definierte Lebensdauer ausgelegt, die über die normale Nutzungsdauer des Produkts erheblich hinausgeht, um so zu gewährleisten, dass zum einen das benötigte Qualitätsniveau erhalten bleibt und zum anderen der Aufbereitungsaufwand gering bleibt.

5.8.3 Potenziale von Remanufacturing für Batterien

Derzeit sind die Anschaffungskosten ein zentraler Grund für die noch geringe Verbreitung von Elektrofahrzeugen, insbesondere wenn vergleichbare Reichweiten, wie bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen, erzielt werden sollen (Abb. 5.51).

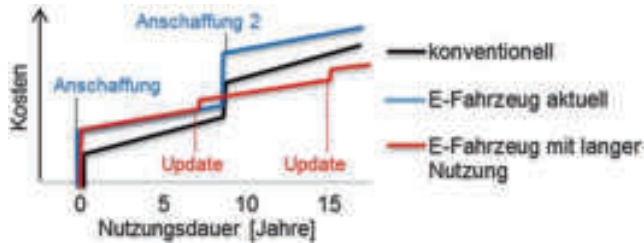


Abb. 5.51 Total Costs of Ownership für Remanufacturing (Kampker et al. 2016b)

Im Hinblick auf den Lebenszyklus eines Fahrzeugs werden die höheren Anschaffungskosten zumeist nicht durch die geringeren Betriebskosten kompensiert. Der Hauptverursacher der hohen Kosten von Elektrofahrzeugen ist die Traktionsbatterie. Eine längere Nutzungsdauer des Fahrzeugs (z. B. 16 Jahre) stellt also einen möglichen Lösungsansatz dar. Dem stehen u. a. die begrenzte Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie gegenüber (Kampker et al. 2016b). Um die Lebensdauer einer Traktionsbatterie weiter zu erhöhen, kann ein kontinuierliches Update der Batterie, wie bei einer Software, ermöglicht werden, anstatt diese über den Lebenszyklus unverändert zu lassen. Da eine Traktionsbatterie aber größtenteils aus „Hardware“ besteht, wird in diesem Zusammenhang von einem Remanufacturing der Lithium-Ionen-Batterie gesprochen. Neben der Verlängerung der Lebensdauer von Traktionsbatterien, können auch wiederaufbereitete Komponenten am Ende der Nutzungsphase in neue Produkte überführt werden. Hierdurch sind zum einen Kostensenkungspotenziale durch den Aufkauf der gebrauchten Batterie aber auch durch die vergünstigten Zukaufteile in der Fertigung von Traktionsbatterien denkbar. Somit kann aus ökonomischer Sicht das Remanufacturing die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und damit deren Verbreitung erhöhen. Aber auch aus ökologischer Sicht ist das Remanufacturing besonders erstrebenswert. Durch eine verlängerte Nutzungsphase kann Abfall reduziert werden und durch die Wiederverwendung von Komponenten werden Ressourcen geschont (Kampker et al. 2016a).

Um die zahlreichen Potenziale von Remanufacturing für Lithium-Ionen-Batterien zu adressieren, wird eine entsprechende Auslegung und das passende Design der Batterien entscheidend. Dabei müssen Modularität, Schnittstellen und die Demontage entsprechend berücksichtigt werden. Außerdem muss für die Werker in der Demontage die Hochvoltsicherheit stets garantiert werden. Das Austauschen von Zellen oder Komponenten muss also ohne Gefahr möglich sein. Abziehbare Verbindungen und Verkabelungen können dabei gepaart mit modularen Schnittstellen die Grundlage für ein remanufacturingfähiges Batteriedesign bilden. Das Batteriemodulgehäuse könnte dabei die Rolle der Aufnahme mit modularen Schnittstellen in Form eines Stecksystems für die Zellen, anstelle von Verschweißung und Verklebung übernehmen. Um ein solches System jedoch automotiv tauglich umzusetzen müssen Crashesicherheit, Isolierung, (Vibrations-)Stabilität und viele weitere Fragestellungen adressiert und weiter erforscht werden.

5.8.4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch ein durchdachtes und abgestimmtes Design, welches standardisierte Schnittstellen und Modularität bietet, zusammen mit entsprechenden Geschäftsmodellen und automatisierten Demontageprozessen können die Potenziale eines Remanufacturing für Lithium-Ionen-Batterien, die sich nicht nur durch den Restwert der Batterie, sondern auch durch mögliche Updates ergeben, gezielt adressiert werden. Dafür ist jedoch weitere Forschung notwendig, um die gezeigten Herausforderungen zu überwinden. Schließlich können so neben Kostenpotenzialen auch ökologische Vorteile durch eine funktionierende Kreislaufwirtschaft generiert werden.

Literatur

- Adam Opel AG (2012) Die Batterie des Opel Ampera. <http://www.opel.de/fahrzeuge/modelle/personenwagen/ampera/highlights/technology.html>. Zugriffen am 10.07.2012
- Afonso J C (2006) Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28.–30.06.2006
- Audi AG (2012) Bildmaterial Elektromobilität, Audi AG. <https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public.html>. Zugriffen am 16.02.2012
- BAN – The Basel Action Network (2009). <http://www.ban.org>. Zugriffen am 05.06.2009
- Batrec Industrie AG (2009) Internetauftritt des Unternehmens. <http://www.batrec.ch>. Zugriffen am 02.06.2009
- BattV (1998) Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV) vom 27.03.1998 (BGBl. I Nr. 20 vom 02.04.1998 S 658)
- Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, GSA – Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft (Hrsg) (2009) Altbatterien gehören nicht in den Kehrriechtsack. Abfallsplitter, Abfall-Information Kanton Bern, Ausgabe 2, 2003. <http://www.bve.be.ch>. Zugriffen am 02.06.2009
- Baumgarten H, Risse J (2001) Logistikbasiertes Management des Produktentstehungsprozesses. In: Hossner R (Hrsg) Jahrbuch der Logistik 150–156. Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf
- Benory AM, Owen L, Folkerson M (2014) Triple win – the social economic and environmental case for remanufacturing. Hrsg.: All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group & All-Party Parliamentary Manufacturing Group, London
- Bille S et al (2011) (UINITY-Fokusgruppe Elektromobilität) Elektromobilität – Perspektiven und Chancen für Unternehmen. <http://www.unity.de/de/veroeffentlichungen/opportunity.html>
- Brieter K (2011) Ein Japaner unter Strom. ADAC Motorwelt 2:46–54
- Bullinger H-J, Spath D, Warnecke H-J, Westkämper E (Hrsg) (2009) Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. (Reihe: VDI), 3., neu bearb. Aufl. Springer, Berlin
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001) Informationen zur Batterieverordnung vom 03.07.2001, Bonn. <http://www.bmu.de>. Zugriffen am 12.05.2009
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.. Internationale Harmonisierung der technischen Vorschriften für Kraftfahrzeuge. <http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB-LA/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html?view=renderDruckansicht&nn=58354>
- Butler D (2004) Li-ion battery recycling in the UK. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02.–04.06.2004

- Castillo S et al (2002) Advances in the recovering of spent lithium battery compounds. *J Power Sources* 112(1):247–254
- Contestabile M et al (2001) A laboratory-scale lithium-ion battery recycling process. *J Power Sources* 92(1–2):65–69
- Coy TR (2001) Lithium battery recycling, established and growing. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Montreux, 02.–04.05.2001
- Coy TR (2006) Recycling Ni, Co and Cd from batteries in the United States. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Interlaken, 28.–30.06.2006
- Czichos H, Hennecke M (2004) *Hütte, das Ingenieurwissen*. Springer, München
- David J (1999) New recycling technologies of rechargeable batteries. International Battery Recycling Congress, Deauville, 27.–29.09.1999
- Deinzer GH (2009) Die Karosserie birgt das größte Potenzial. *Automobilwoche*, Oktober 2009
- DIN IEC 60664: Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen
- Döhring-Nisar E et al (2001) *Die Welt der Batterien – Funktion, Systeme, Entsorgung*. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg
- Dorella G, Mansur MB (2007) A study of the separation of cobalt from spent Li-ion battery residues. *J Power Sources* 170(1):210–215
- ECE-R 10: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit
- ECE-R 100: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Bauweise und die Betriebssicherheit 42-V-Bordnetz – 42 V on-board power supply <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/42-V-Bordnetz-42-V-on-board-power-supply.html>
- ECE-R 85: Messung der Motorleistung
- Eckstein L, Schmitt F, Hartmann B (2010) Leichtbau von Elektrofahrzeugen. *ATZ* 11
- EG (1991) EG-Richtlinie 91/157/EEC vom 18.03.1991: COUNCIL DIRECTIVE of 18 March 1991 on batteries and accumulators containing certain dangerous substances (91/157/EEC)
- EG (1993) EG-Richtlinie 93/86/EEC vom 04.10.1993: COMMISSION DIRECTIVE 93/86/EEC of 4 October 1993 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances
- EG (1998a) EG-Richtlinie 98/101/EC vom 22.12.1998: COMMISSION DIRECTIVE 98/101/EC of 22 December 1998 adapting to technical progress Council Directive 91/157/EEC on batteries and accumulators containing certain dangerous substances
- EG (1998b) EG-Richtlinie 2008/12/EC vom 11.03.2008: DIRECTIVE 2008/12/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 March 2008 amending Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, as regards the implementing powers conferred on the Commission
- EG (2006) EG-Richtlinie 2006/66/EC vom 06.09.2006: DIRECTIVE 2006/66/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC
- EG (2007a) Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge
- EG (2007b) Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007, Artikel 3 Abs. 3
- EG (2008) EG-Richtlinie 2008/103/EC vom 19.11.2008: DIRECTIVE 2008/103/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 amending Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators as regards placing batteries and accumulators on the market

- EG (2011) Verordnung (EU) Nr. 678/2011 der Kommission vom 14. Juli 2011 zur Ersetzung des Anhangs II und zur Änderung der Anhänge IV, IX und XI der Richtlinie 2007/46/EG
- EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (2011) EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 126), die durch Artikel 27 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist
- Ellar AM, Liwat CG (1987) Development of a new cobalt recovery process at the Surigao Nickel Refinery. *Int J Miner Process* 19(1–4):311–322
- E-Mobility – Die Normung im Blick (2011) <http://www.bsozd.com/?p=592666>
- Espinosa DC et al (2004) An overview on the current processes for the recycling of batteries. *J Power Sources* 135(1–2):311–331
- European Commission (2009) Recycling of primary and secondary lithium batteries. Record Control Number 51959, Informationen zum VALIBAT-Projekt. <http://ec.europa.eu/>. Zugegriffen am 25.05.2009
- Eversheim W (2006) 100 Jahre Produktionstechnik. Springer, Berlin
- EWG (1970) Richtlinie des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger (70/156/EWG)
- Fahrzeugzulassungsverordnung (2011) Fahrzeug-Zulassungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 139), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 12. Juli 2011 (BGBl. I S. 1378) geändert worden ist
- Fiebig A et al (2005) Subjektive Evaluierung hat Methode – Ein anwendungsbezogenes Design zur Beurteilung von Geräuschen. DAGA, München
- Fitzek, D (2004) Abschlussbericht des internationalen Benchmarking-Projekts „Anlaufmanagement für Automobilzulieferer“. St. Gallen
- Fitzek D (2006) Anlaufmanagement in Netzwerken: Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie. Haupt, Bern
- Frese E (1998) Grundlagen der Organisation: Konzept – Prinzipien – Strukturen. Gabler, Wiesbaden
- Fricke J L (2009) Jahresbericht/Dokumentation 2008 – Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung gemäß § 10 BattV. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg
- Future Steel Vehicle, World Auto Steel. <http://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/>. Zugegriffen am 10.07.2012
- Gavinet C (1999) 6 Years experience in lithium battery recycling. International Battery Recycling Congress. Deauville, 27.–29.09.1999
- GDV (2006) Sicherheitsrisiko von Leichtkraftfahrzeugen – Informationsgespräch der Unfallforschung der Versicherer am 6. Dezember 2006 in München. http://www.gdv.de/Presse/Archiv_der_Presseveranstaltungen/Presseveranstaltungen_2006/inhaltssite20060.html. Zugegriffen am 16.05.2007
- Gentner A (1994) Entwurf eines Kennzahlensystems zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung von Entwicklungsprojekten. Dissertation, RWTH Aachen
- Genuit K (2008) Interdisciplinary approaches for optimizing vehicle interior noise, 5. SNVH Kongress, Graz
- Genuit K (Hrsg) (2010) Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer, Heidelberg
- Genuit K (2011) Warnsignale für leise Fahrzeuge – im Spannungsfeld zwischen Lärm (Emission) und Sicherheit. Automotive Acoustics Conference, 1. Internationale ATZ-Fachtagung, Juli 2011, Zürich
- Genuit K, Fiebig A (2007) The influence of combined environmental stimuli on the evaluation of acoustical comfort: case studies carried out in an interactive simulation environment. *Int J Veh Noise Vib* 3(2):119–129

- Genuit K, Fiebig A (2011) Fahrzeugakustik und Sound Design im Wandel der Zeit. ATZ 07–08:530–535
- Genuit K et al (1997) Binaural „Hybrid“ model for simulation of noise shares in the interior of vehicles. Inter-Noise 1997, Budapest
- Genuit K et al (2006) New approach for the development of vehicle target sounds. Internoise 2006, Honolulu
- Georgi-Maschler T (2011) Entwicklung eines Recyclingverfahrens für portable Li-Ion-Gerätebatterien. Dissertation, RWTH Aachen University, Shaker-Verlag
- Gesetz über das Inverkehrbringen (2009a) die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz – BattG) vom 25.06.2009 (BGBl. I Nr. 36 vom 30.06.2009 S 1582)
- Gesetz über das Inverkehrbringen (2009b) die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz – BattG) vom 25.06.2009, das zuletzt durch Art. 1 vom 20.11.2015 geändert worden ist
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27.09.1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22.12.2008 (BGBl. I S 2986)
- Goede M, Ferkel H, Stieg J, Dröder K (2005) Mischbauweisen Karosseriekonzepte – Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau. 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen
- Göpfert J (1998) Modulare Produktentwicklung. Gabler, Wiesbaden
- Göpfert J, Steinbrecher M (2000) Modulare Produktentwicklung leistet mehr. Harv Bus Manager 3:20–32
- Grabner J, Nothhaft R (2006) Konstruieren von PKW-Karosserien. Springer, Berlin
- Gray C, Charter M (2007) Remanufacturing and product design – designing for the 7th generation. The Centre for Sustainable Design, University College for the Creative Arts, Farnham
- GRB Working Group on Quiet Road Transport Vehicles (UNECE) (2011) Proposal for guidelines on measures ensuring the audibility of hybrid and electric vehicles to be added to [R.E.3 and/or S.R.1]. Document GRB-53-09
- Hahn D, Kaufmann L (2002) Handbuch Industrielles Beschaffungsmanagement. Gabler, Wiesbaden
- Hardies AC (2008) High temperature metal recovery from spent batteries. EBR – Electronics & Battery Recycling. Toronto, 03.–06.06.2008
- Hauck U. (o. J.) Standardisierung ist das Gebot der Stunde. <http://www.e-auto-industrie.de/energie/articles/295685>. Zugriffen am 20.01.2012
- Henrion P (2004) Battery recycling – a perspective from a nickel and cobalt producer. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Como, 02.–04.06.2004
- Henrion P (2008a) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. EBR – Electronics & Battery Recycling, Toronto. 03.–06.06.2008
- Henrion P (2008b) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Düsseldorf, 17.–19.09.2008
- Heß G (2008) Supply-Strategien in Einkauf und Beschaffung. Springer, München
- Hofheinz W (2010) Auf die Isolation kommt es an. <http://www.e-auto-industrie.de/bordnetz/articles/295738>. Zugriffen am 20.02.2012
- Hurtado MdRF (2005) Method of recovering lithium ion batteries LG cellphone. ICBR – International Congress for Battery Recycling; Barcelona/Sitges, 08.–10.06.2005
- Hüttl RF, Pischetsrieder B, Spath D (2010) Elektromobilität – Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Springer, Berlin
- IEC 61508: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems

- IEC 61980-1: Electric equipment for the supply of energy to electric road vehicles using an inductive coupling; General requirements
- IEC 62196: Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles
- IEC 62351: Data and communication security (Security for Smart Grid)
- Inmetco Inc (2009) Internetauftritt des Unternehmens. <http://www.inmetco.com>. Zugegriffen am 17.07.2012
- ISO (1977) 3833:1977 Road vehicles – types – terms and definitions. International Standards for Business, Government and Society
- ISO 26262 Road vehicles – functional safety
- ISO 6469-3 Electric propelled road vehicles – safety specifications; protection of persons against electric shock
- ISO 6722 Road vehicles – 60 V and 600 V single-core cables
- ISO/IEC 15118 Road vehicles – communication protocol between electric vehicle and grid
- Jania T (2004) Änderungsmanagement auf Basis eines integrierten Prozess- und Produktdatenmodells mit dem Ziel einer durchgängigen Komplexitätsbewertung. Dissertation, Universität Paderborn
- Kampker A (2014) Elektromobilproduktion. Springer, Berlin
- Kampker A, Heimes H, Ordnung M, Lienemann C, Hollah A, Sarovic N (2016a) Evaluation of a remanufacturing for lithium ion batteries from electric cars. 18th international conference on automotive and mechanical engineering, Sydney
- Kampker A, Kreisköther K, Hollah A, Lienemann C (2016b) Electromobile remanufacturing – Nutzenpotenziale für batterieelektrische Fahrzeuge. 5th conference on future automotive technology (COFAT), Fürstenfeld
- KBA (2009) Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern. Stand April 2009, SV 1. Kraftfahrt-Bundesamt
- Ke Q, Zhang H-C, Liu G, Li B (2011) Remanufacturing engineering – literature overview and future research needs. In: Hesselbach J, Hermann C (Hrsg) Globalized solutions for sustainability in manufacturing. Proceedings of the 18th CIRP international conference on life cycle engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. Springer, Berlin/Heidelberg, S 437–442
- Kim D-S et al (2003) Simultaneous separation and renovation of lithium cobalt oxide from the cathode of spent lithium ion rechargeable batteries. J Power Sources 132(1–2):145–149
- Kirst P (2006) Gelungener Start dank Anlaufmanagement: Der Erfolg von Serienneuanläufen wird nicht beim Automobilhersteller entschieden. DVZ 60/124:38
- Korthauer R (2013) Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer, Berlin
- Krebs A (2002) Batrec process for spent Li-batteries. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Wien, 03.–05.07.2002
- Krebs A (2003) Batrec news – Industrial recycling of spent lithium batteries. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Lugano, 18.–20.06.2003
- Krebs A (2005) About lithium batteries. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Barcelona/Sitges, 08.–10.06.2005
- Krebs A (2006) Latest developments at Batrec. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Interlaken, 28.–30.06.2006
- Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24 (2012) (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S 1324) geändert worden ist
- Krust M (2011) Daimler und Bosch wollen Produktion von E-Motoren 2012 starten. Automobilwoche. <http://www.automobilwoche.de/article/20110412/REPOSITORY/110419992/1139>. Zugegriffen am 06.06.2011
- Kuhn A et al (2002) „fast ramp-up“ – Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Verlag Praxiswissen, Dortmund

- Lage M Jr, Filho MG (2012) Production planning and control for remanufacturing – literature review and analysis. *Prod Plan Control* 23:419–435
- Lain MJ (2001) Recycling of lithium ion cells and batteries. *J Power Sources* 97–98:736–738
- Laufenberg L (1996) Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering. Shaker, Aachen
- Lee C-K, Rhee K-I (2007) Preparation of LiCoO_2 from spent lithium-ion batteries. *J Power Sources* 109(1):17–21
- Li J et al (2007) Preparation of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode materials from spent Li-ion batteries. *Trans Nonferrous Met Soc Chin* 17(5):897–901
- Lindemann U, Reichwald R (1998) Integriertes Änderungsmanagement. Springer, Berlin
- Lupi C, Pasquali M (2003) Electrolytic nickel recovery from lithium-ion batteries. *Miner Eng* 16(6):537–542
- Lupi C et al (2005) Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical process. *Waste Manag* 25(2):215–220
- Matthies G et al (2010) Zum E-Auto gibt es keine Alternative. Bain & Company, München
- McKinsey (2003) HAWK 2015 – Herausforderung Automobile Wertschöpfungs-Kette. Eine Studie von McKinsey & Company und dem VDA. Heinrich Druck + Medien GmbH, Frankfurt am Main
- Metallurgische Exkursion des IME 2008, Information im Rahmen einer Unternehmensbesichtigung bei der Batrec Industrie AG. Wimmis, 19.09.2008
- Michelin (2004) Michelin Active Wheel. <http://www.michelin.com/corporate/EN/news/article?articleID=N13730>. Zugriffen am 10.07.2012
- Miller DG, McLaughlin B (2001) Recycling the lithium battery. In: Pistoia G et al (Hrsg) *Used battery collection and recycling*. Elsevier Science, Amsterdam
- Möller K (2002) Lebenszyklusorientierte Planung und Kalkulation des Serienanlaufs. *Z Planung* 13(4):431–457
- Nan J et al (2006) Recovery of metal values from a mixture of spent lithium-ion batteries and nickel-metal hydride batteries. *Hydrometallurgy* 84(1–2):75–80
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) (2009) Incidence of pedestrian and bicyclist crashes by hybrid electric passenger cars. Dot HS 811204: Technical Report, USA
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010) AG 4 – Normung, Standardisierung und Zertifizierung: Vorschriften in den Bereichen Kraftfahrzeugtechnik und Gefahrguttransport. http://www.elektromobilitaet.din.de/sixcms_upload/media/3310/Bericht_Vorschriften_Gefahrguttransport.pdf. Zugriffen am 02.02.2012
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2014) Die deutsche Normungsroadmap: Elektromobilität – Version 3. <https://www.dke.de/de/std/aal/documents/nr%20elektromobilit%C3%A4t%20v3.pdf>. Zugriffen am 23.09.2016
- Neuhausen J (2002) Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation, RWTH Aachen
- NN (2010a) An assessment of mass reduction opportunities for a 2017–2020 Model Year Vehicle Program. Studie Lotus Engineering Inc.
- NN (2010b) Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. ETG VDE Taskforce Studie
- NPE. (AG 4) Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0, Dezember 2014
- Onto Technology LLC (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter <http://www.onto-technology.com>. Zugriffen am 05.06.2009
- Parametric Technology GmbH (2012) Definition of an integral architecture for a virtual development – PLM Solution StreetScooter
- Peters A, Hoffmann J (2011) Forschungsbericht Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Fraunhofer ISI. http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Ergebnisbericht_Fokusgruppen_2011_tcm243-92030.pdf. Zugriffen am 12.01.2012

- Pfohl HC, Gareis K (2000) Die Rolle der Logistik in der Anlaufphase. *Z Betriebswirt* 70(11):1189–1214
- Pletschen B (2010) Akustikgestaltung in der Fahrzeugentwicklung. In: Genuit K (Hrsg) *Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen*. Springer, Heidelberg
- Rausch A, Broy M (2008) *Das V-Modell XT – Grundlagen, Erfahrungen und Werkzeuge*. Dpunkt. Verlag, Heidelberg
- Recupyl S.A.S. (2009) <http://www.recupyl.com>. Zugriffen am 05.06.2009
- Rentz O et al (2001) Untersuchung von Batterieverwertungsverfahren und -anlagen hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Relevanz unter besonderer Berücksichtigung des Cadmiumproblems. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsprojekt 299 35 330, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe (TH)
- Rosenberg A (2001) Battery recycling at METEK Metal Technology in Israel. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Montreux, 02.–04.05.2001
- Rosenberg A (2004) Multi batteries non sorted recycling technology through hydrometallurgy. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02.–04.06.2004
- RWTH Aachen (2009) Konzeptphase Projekt StreetScooter, erster Grobpackageentwurf
- S.N.A.M. (2009) Internetauftritt des Unternehmens. <http://www.snam.com>. Zugriffen am 05.06.2009
- Sagawe T (2010) Sicherheit der Hochvolttechnik bei Elektro- und Hybridfahrzeugen. http://www.sachverstaendigentag21.de/downloads/6_Sagawe.pdf. Zugriffen am 08.08.2011
- Sandberg U et al (2010) Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. ICA 2010, Sydney
- Sauer DU, Lunz B (2010) *Technologie und Auslegung von Batteriesystemen für die Elektromobilität*. Solar Mobility, Berlin
- Sauler J, Kriso S (2009) Standardisierung: ISO 26262 – Die zukünftige Norm zur funktionalen Sicherheit von Straßenfahrzeugen. <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/themen/elektronikmanagement/projektqualitaetsmanagement/articles/242243/>. Zugriffen am 08.11.2011
- Schäppi B et al (2005) *Handbuch Produktentwicklung*. Hanser, München
- Schmidt G (1994) *Organisatorische Grundbegriffe*. Schmidt, Gießen
- Schmitt F (2011) *Leichtbau von Elektrofahrzeugen – eine wirtschaftliche Notwendigkeit*. Innomateria, Köln
- Schneider M, Lücke M (2002) Kooperations- und Referenzmodelle für den Anlauf: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. *wt Werkstatttechnik online* 92/10:514–518
- Schönau H, Baumann M (2013) Normung für die Sicherheit und Performance von Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer R (Hrsg) *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer, Berlin
- Schönfelder M et al (2009) Elektromobilität – Eine Chance zur verbesserten Netzintegration Erneuerbarer Energien. *uwf – UmweltWirtschaftsForum* 17(4):373–380
- Schuh G (2006) *Produktionsplanung und Steuerung*. Springer, Berlin
- Schuh G et al (2005) Anlaufmanagement – Kosten senken, Anlaufzeit verkürzen, Qualität sichern. *wt Werkstatttechnik online* 95/5:405–409
- Schuh G et al (2008) *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen*. Springer, Berlin
- SEI (2015) Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles and outlook on implications for stationary storage. <http://content.lichtblick.de/sfiibs/docs/default-source/news-%28pdf%29/2015/presentation-sei-rapidly-falling-costs-for-battery-packs.pdf?sfvrsn=0>. Zugriffen am 04.03.2017
- Seidel M (2005) *Methodische Produktplanung*. Universitätsverlag, Karlsruhe

- Sellerbeck P, Nettelbeck C (2010) Verbesserung des Geräusch- und Schwingungskomforts von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Aachener Akustik Kolloquium 2010, Aachen
- Shin S-M et al (2005) Development of a metal recovery process from spent Li-ion battery wastes. *Hydrometallurgy* 79(3–4):172–181
- Sloop SE (2008) Advanced battery recycling. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17.–19.09.2008
- Sohn J-S (2003) Collection and recycling of spent batteries in Korea. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18.–20.06.2003
- Sohn J-S et al (2006) Hydrometallurgical approaches for selecting the effective recycle process of spent lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy R G (Hrsg), TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Sohn International Symposium, Advanced processing of metals and materials, Bd 6. New, improved and existing technologies: aqueous and electrochemical processing
- Stölzle W, Kirst P (2006) Portfolios als risikoorientiertes Instrument zur Steigerung des erwarteten Wertbeitrags im Lieferantenmanagement. In: Jacquemin M, Pibernik R, Sucky E (Hrsg) Quantitative Methoden der Logistik und des SCM. Festschrift für Prof. Dr. Heinz Isermann. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg
- Stölzle W, Hofmann E, Hofer F (2005) Supply Chain Costing: Konzeptionelle Grundlagen und ausgewählte Instrumente. In: Brecht U (Hrsg) Neue Entwicklungen im Rechnungswesen. Gabler, Wiesbaden
- Straßenverkehrszulassungsordnung (2009) Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988 (BGBl. I S. 1793), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 21. April 2009 (BGBl. I S. 872) geändert worden ist
- Straube F (2004) e-Logistik – Ganzheitliches Logistikmanagement. Springer, Berlin
- StVZO § 21a Anerkennung von Genehmigungen und Prüfzeichen auf Grund internationaler Vereinbarungen und von Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaften
- StVZO § 62 Elektrische Einrichtungen von elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen
- Süddeutsche Zeitung (2007) Begehrter Rohstoff. 280:11, 05.12.2007
- Sundin E (2004) Erik, product and process design for successful remanufacturing. Dissertation, Linköpings Universitet
- Tedjar F (2003) Challenge for recycling new batteries and fuel cells. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18.–20.06.2003
- Tedjar F (2006) Recupyl process for recycling lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy R G (Hrsg), TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Sohn International Symposium; Advanced processing of metals and materials, Bd 5, New, improved and existing technologies: iron and steel and recycling and waste treatment
- Tedjar F (2008) From portable batteries to hybrid vehicle and electrical vehicles batteries – extension of Recupyl process. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17.–19.09.2008
- Tesla Motors (2013) https://www.teslamotors.com/sites/default/files/blog_attachments/gigafactory.pdf. Zugegriffen am 02.03.2017
- Thomke S, Fujimoto T (2000) The effect of „Front-Loading“ problem-solving on product development performance. *J Prod Innov Manag* 17:128–142
- Thompson S (2004) Recycling HEV batteries in the US. ICBR – International Congress for Battery Recycling. Como, 02.–04.06.2004
- Tollinsky N (2009) Xstrata boosts recycling capacity. *Sudbury Mining Solut J* 5/2:1 und 36. <http://www.sudburyminingsolutions.com>. Zugegriffen am 02.06.2009
- Ulrich K, Eppinger SD (2000) Methodologies for Product Design and Development, 2. Aufl. McGraw-Hill, New York

- Umicore: Artikel (2010) The Umicore process: recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial Closed Loop. www.batteryrecycling.umicore.com. Zugriffen am 31.08.2011
- UNECE (2014) ECE Addendum 9: Regulation No. 10 Revision 5. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/updates/R010r5e.pdf>. Zugriffen am 05.05.2017
- VDE (2012) VDE-Kompodium „Elektromobilität“. Symposium Elektromobilität – Ausgewählte Vorträge. http://www.vde.com/de/Technik/e-mobility/Testing/Documents/VDE_Kompodium_Elektromobilitat.pdf. Zugriffen am 28.04.2017
- Verordnung (EU) Nr. 493/2012 der Kommission vom 11. Juni 2012 mit Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Recyclingeffizienzen von Recyclingverfahren für Altbatterien und Altakkumulatoren gemäß der Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR
- Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV) vom 27.03.1998 (BGBl. I Nr. 20 vom 02.04.1998 S 658); neugefasst durch Bekanntmachung vom 02.07.2001 (BGBl. I S 1486), geändert durch Artikel 7 des Gesetzes vom 09.09.2001 (BGBl. I S 2331)
- Wallentowitz H et al (2010) Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
- Walther G (2010) Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke. Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus, 1. Aufl. Springer, Berlin
- Wangenheim S (1998) Integrationsbedarf im Serienanlauf dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie. In: Horváth P, Fleig G (Hrsg) Integrationsmanagement für neue Produkte. Schäffer-Poeschel, Stuttgart
- Weber J (2009) Automotive development process – process for successful customer oriented vehicle development. Springer, Berlin
- Wiaux J-P (2002) Lithium batteries in European countries – technology, market, collection and recycling. ICBR – International Congress for Battery Recycling, Wien, 03.–05.07.2002
- Wiesinger G, Housein G (2002) Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. wt Werkstattstechnik online 92/10:505–508
- Wildemann H (2006) Anlaufmanagement: Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten. TCW, München
- Wissmann R (2008) Batterie-Recycling wird privatisiert. Der Bund S 19. Tageszeitung vom 19.09.2008, Espace Media, Bern
- Witt C (2006) Interorganizational new product launch management: an empirical investigation of the automotive industry. Dissertation, Universität St. Gallen
- World Health Organization (WHO), Europe (2011) Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. WHO, Bonn
- Zanner S et al (2002) Änderungsmanagement bei verteilten Standorten. Ind Manag 18(3):40–43
- ZF Friedrichshafen AG (2001) Electric Twist Beam Axle. http://www.zf.com/corporate/de/press/press_releases/press_release.jsp?newsId=21852712. Zugriffen am 16.02.2012
- Zhang P et al (1998) Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries. Hydrometallurgy 47(2–3):259–271