

Dirk Morche, Fabian Schmitt, Klaus Genuit, Olaf Elsen,
Achim Kampker und Bernd Friedrich

5.1 Fahrzeugklassen

Dirk Morche

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

D. Morche (✉) · F. Schmitt · O. Elsen
StreetScooter GmbH, Hüttenstra. 1-9, 52068 Aachen, Deutschland
e-mail: morche@streetscooter.eu

F. Schmitt (✉)
e-mail: schmitt@streetscooter.eu

O. Elsen (✉)
e-mail: elsen@streetscooter.eu

K. Genuit (✉)
Head Acoustics GmbH, Ebertstraße 30a, 52134 Herzogenrath, Deutschland
e-mail: Klaus.Genuit@head-acoustics.de

A. Kampker (✉)
Werkzeugmaschinenlabor (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstraße 19,
52074 Aachen, Deutschland
e-mail: a.kampker@wzl.rwth-aachen.de

B. Friedrich (✉)
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen University,
Intzestrasse 3, 52072 Aachen, Deutschland
e-mail: bfriedrich@ime-aachen.de

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

Eine Typp Genehmigung 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 2007a).

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 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 A 2 Emissionsklassen
- Teil A 3 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.

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. – EG-Kleinserientypgenehmigung nach Rili 2007/46/EG Artikel 22: max. 1.000 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. – 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. – 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. – 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. 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. – 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. – 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. – 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

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. Beispielklassen hierfür sind: SA (Wohnmobile), SB (beschussgeschützte Fahrzeuge) und SC (Krankentransportwagen).

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. 1.500–2.000 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

Fabian Schmitt

Seit seiner Erfindung vor mehr als 125 Jahren hat sich das grundlegende Konzept des Automobils nicht signifikant geändert und die Weiterentwicklung war eher evolutiv-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

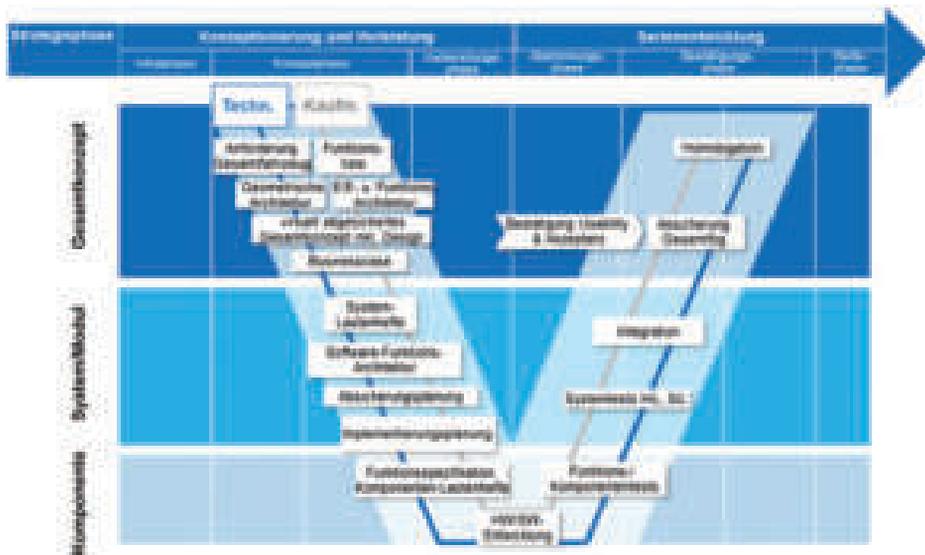


Abb. 5.1 V-Modell zur Produktentwicklung

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
- CAE-Datenintegration
- Datensicherheit
- Projektplanung und -management (Zeit, Kosten, Qualität, Risiko ...)
- Digitale Prozessdefinitionen, Workflow-Management
- Modulare Produktarchitektur
- Variantenmanagement

- Gleich- und Normteilemanagement
- Softwaremanagement
- Compliance
- Kommunikationsmanagement
- Procurementmanagement
- Einhaltung weltweiter legal Requirements
- ...

Besonders der Bereich der virtuellen Entwicklung und Absicherung von Fahrzeugen hat in den letzten zwei Jahrzehnten eine dramatische Entwicklung genommen. Während anfänglich 3-D-CAD-Programme nur benutzt wurden, um später 2-D-Fertigungszeichnungen abzuleiten, sind die Anforderungen an eine integrale Architektur für eine gemeinsame virtuelle Entwicklungsumgebung als zentrale Kommunikationsplattform in den letzten Jahren massiv gestiegen und stellen viele OEMs vor die Aufgabe, ihre Strukturen anzupassen (s. Abb. 5.2).

Die virtuelle Entwicklungsumgebung bzw. die Software Product Life Cycle Management (PLM) verbindet mit der Bill of Material (BOM) als zentrale Struktur des Systems (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



Abb. 5.2 Definition einer integralen Architektur zur gemeinsamen virtuellen Entwicklung. *Quelle* PTC 2012



Abb. 5.3 BOM als Struktur der virtuellen Entwicklungsumgebung

- 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

Fabian Schmitt

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).

Da primär das Äußere und das Innere 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. 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

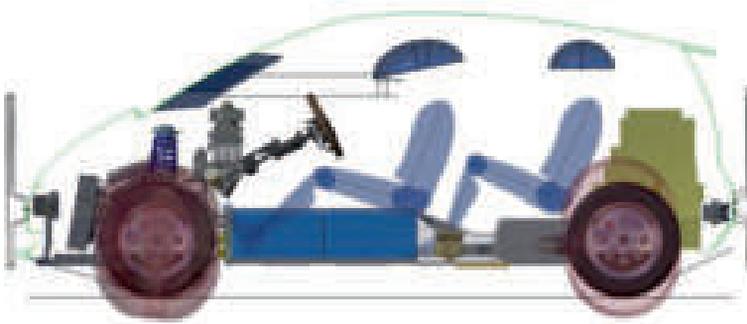


Abb. 5.4 Future Steel Vehicle 3-D-Package. *Quelle* Future Steel Vehicle (o. J.)

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



sind, die rechtlichen Bestimmungen sowie Komfort- und Sichtanforderungen 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. Abbildung 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. Abbildung 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 (s. Abb. 5.7) ist aufgrund der Größe

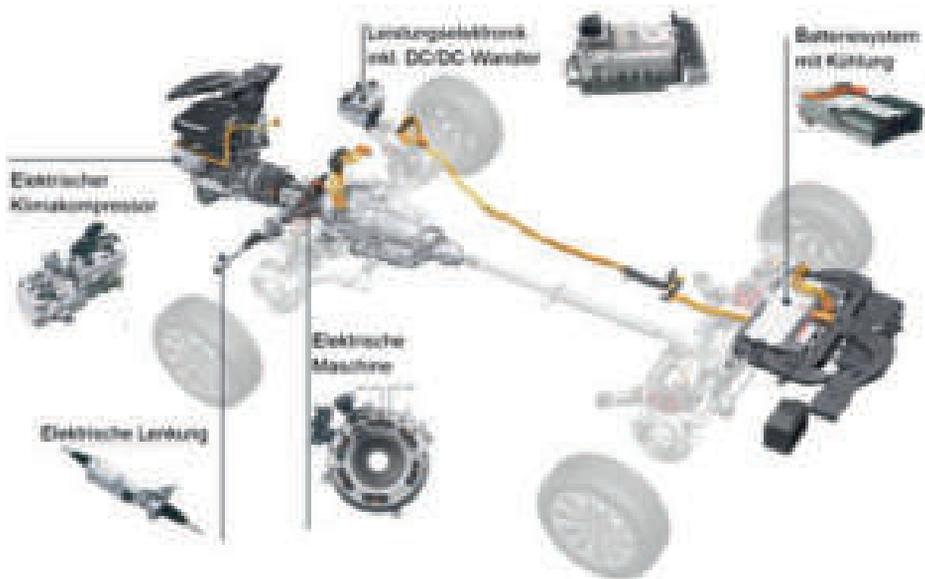


Abb. 5.6 Packagebestimmende Komponenten der Elektromobilität. *Quelle* Audi AG (2012)

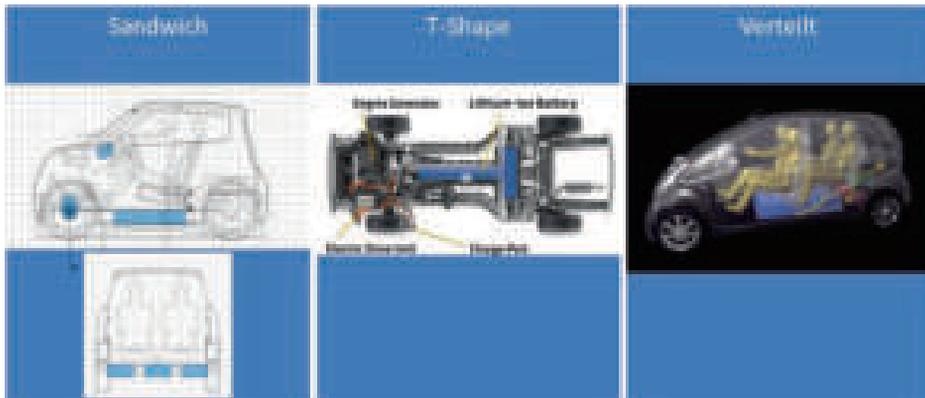


Abb. 5.7 Unterschiedliche Ansätze des Batteriepackages im Fahrzeugboden. *Quelle* RWTH Aachen (2009), Adam Opel AG (2012), Honda und Yoshida (2007)

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:

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

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 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 Differential 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 Differentials. Die zentrale Maschine mit mechanischem Differential beansprucht hierbei den größten Bauraum. Durch den Einsatz von zwei Elektromotoren an einer Achse kann auf ein mechanisches Differential 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).

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.



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

5.4 Funktionale Auslegung

5.4.1 Noise, Vibration, Harshness (NVH)

Klaus Genuit

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 Schalldruckpegelbetrachtungen 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, resultierend in einem leiseren Gesamtgeräusch, ist das Geräuschphänomen Hinterachsheulen wieder verstärkt wahrzunehmen und verlangt nach neuer Optimierung.



Abb. 5.9 Prozess der Fahrzeuggeräuschoptimierung

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 mithilfe 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. Mithilfe 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 Fahrsimulator zu ermöglichen.

Abbildung 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, wie in Abb. 5.11 gezeigt, 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.

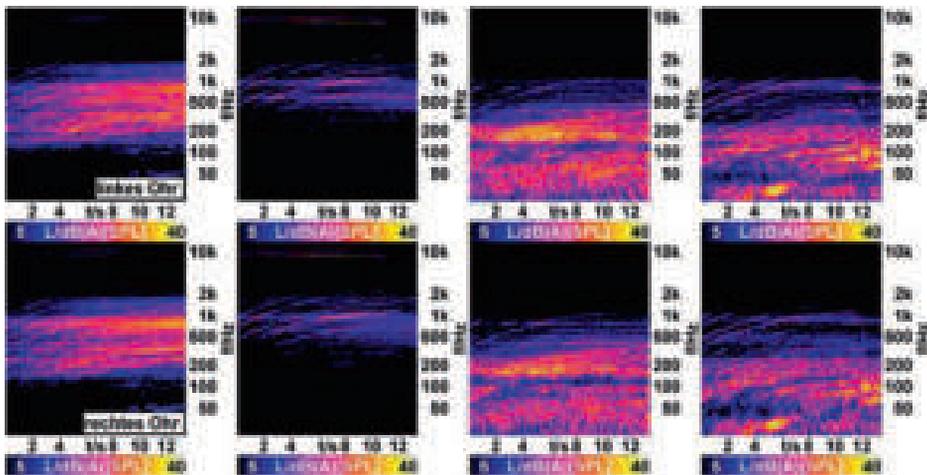


Abb. 5.11 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektroantriebs am Innengeräusch bei einer Beschleunigung von 0 auf 50 km/h. Von links nach rechts: Luftschallbeitrag des Elektromotors, Luftschallbeitrag des Umrichters, Körperschallbeitrag der Antriebswellen, Körperschallbeitrag des Elektromotors,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

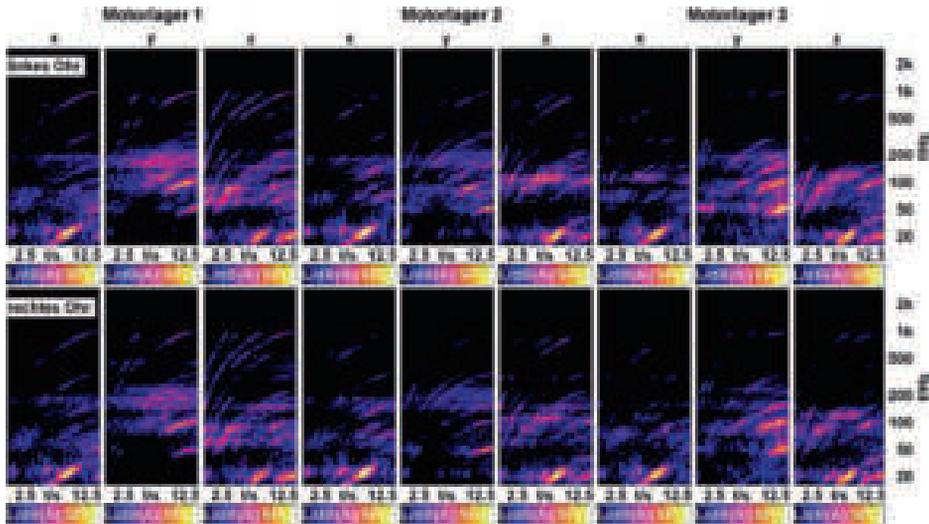


Abb. 5.12 Spektrogramme von den Geräuschanteilen des Elektromotors (Körperschall über Motorlager) am Innengeräusch (Beschleunigung von 0 auf 50 km/h), FFT über Zeit

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.

Mithilfe 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. Abbildung 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-Richtung 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. Abbildung 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.

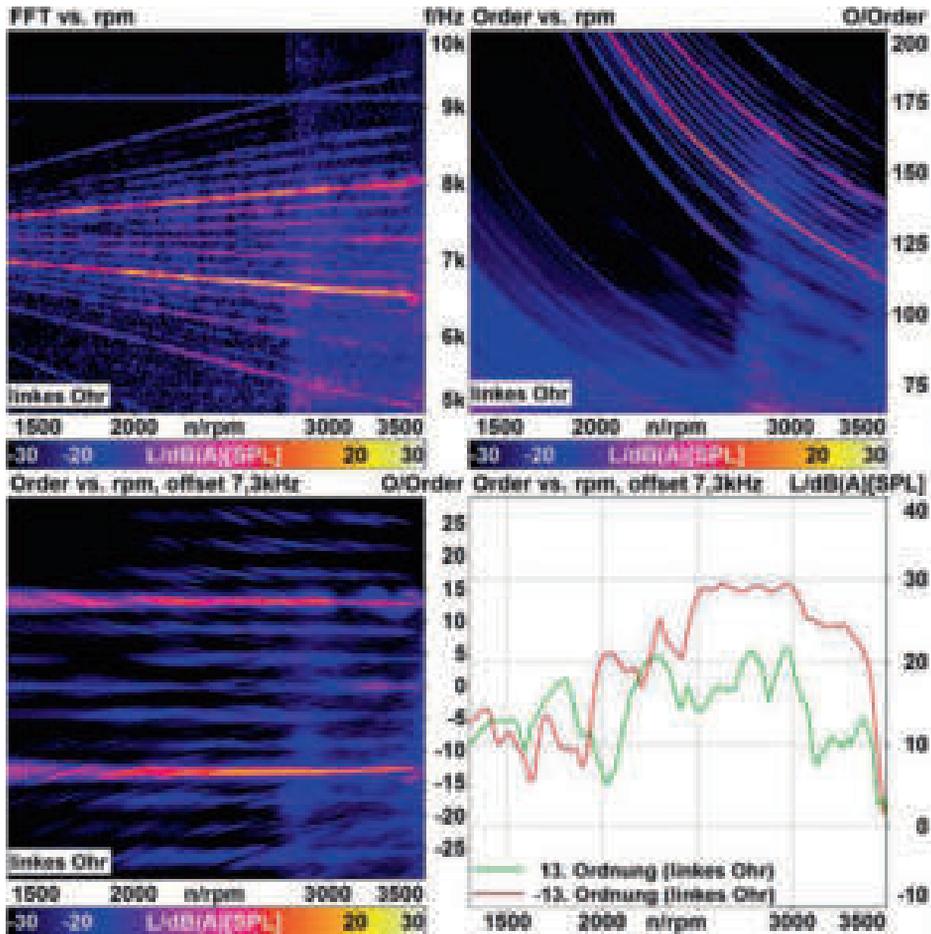


Abb. 5.13 Spektrogramme vom originalen Innengeräusch (Zoom in den höherfrequenten Bereich) für das linke Ohr; von oben links nach unten rechts: FFT über Drehzahl, Ordnungsspektrum über Drehzahl, Ordnungsspektrum mit Frequenzversatz (7,3 kHz) über Drehzahl, Ordnungsspektrum über Drehzahl (mit Frequenzversatz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

Die Ordnungen des Umrichters verlaufen nicht proportional zur Motordrehzahl ($n \cdot \text{Drehzahl}/60$), sondern stellen sich als geschwungene Kurvenverläufe im konventionellen Ordnungsspektrum dar. Mithilfe einer Ordnungsanalyse, bei der die Schaltfrequenz des Umrichters als „Frequenzversatz“ eingestellt wird, lässt sich eine weitere sinnvolle Ordnungsanalyse 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. Abbildung 5.14 zeigt eine sukzessive virtuelle Optimierung, in der zuerst die Entkopplung des 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 dem Elektromotor und nachfolgend vom 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.

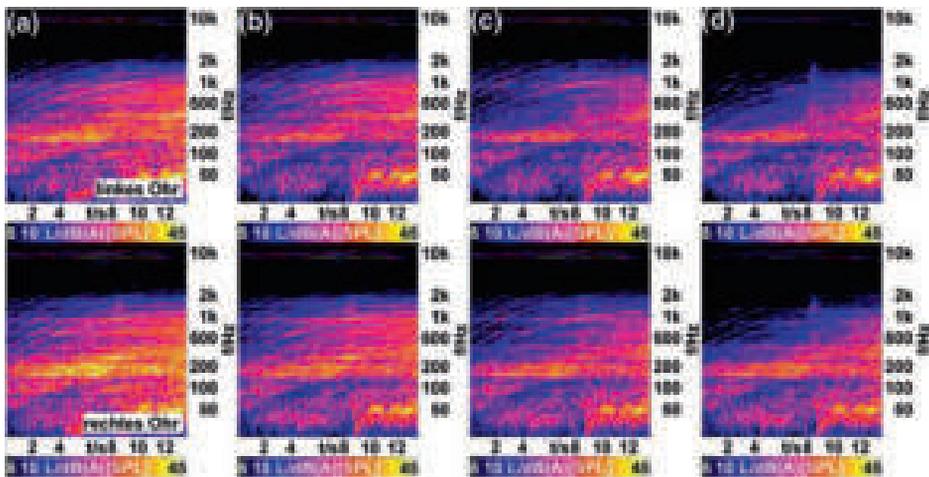


Abb. 5.14 Spektrogramme vom originalen Innengeräusch **a** und von simulierten Optimierungsmaßnahmen (**b**: Optimierte Lagerung des Elektromotors, **c**: **b** und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Elektromotors, **d**: **b**, **c** und eine zusätzliche Luftschallkapselung des Umrichters) für eine Beschleunigung von 0 auf 50 km/h, FFT über Zeit

Neben der beschriebenen Vorgehensweise zur Verbesserung der Innengeräusche von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, in denen Störgeräusche und unerwünschte Geräuschemuster 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 Markenkennwerte akustisch vermittelt werden? Sollte nur der vorhandene Elektromotorsound akustisch optimiert werden?

Eine einfache Aufrechterhaltung des vorhandenen Elektromotorsounds 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. Fahr simulatoren, 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 (Schulte-Fortkamp 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.



Abb. 5.15 Fahr simulatoren; links: stationärer Fahr simulator (mit Videoprojektion), rechts: mobiler Fahr simulator (auf der Straße)

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. Abbildung 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 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 Straßenverkehrsgeräuschen 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. Abbildung 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.

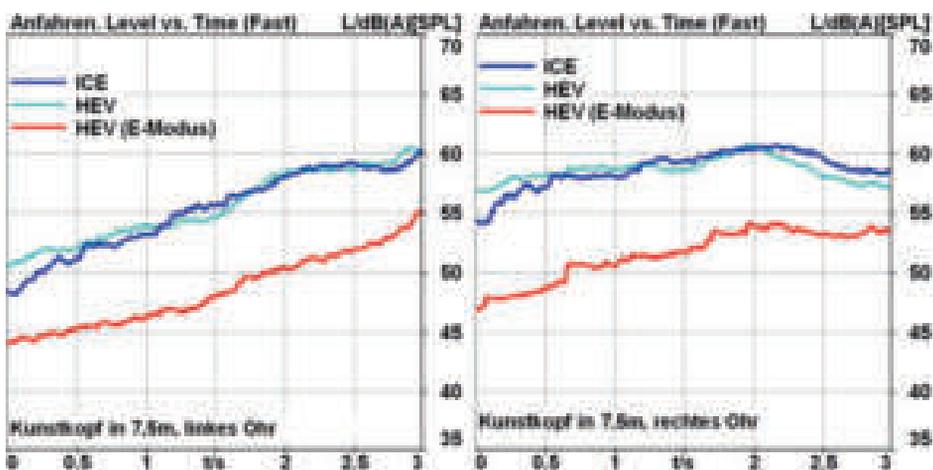


Abb. 5.16 Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation, Schalldruckpegel über Zeit

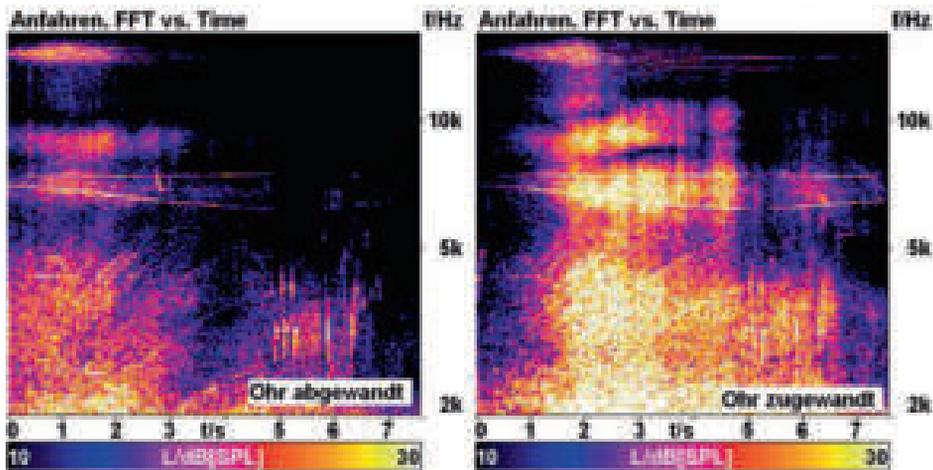


Abb. 5.17 Vorbeifahrtmessung einer Anfahrtsituation eines Elektrofahrzeugs (Serienfahrzeug), FFT über Zeit

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 (siehe Sandberg et al. 2010). Ungeachtet dessen planen die USA und Japan bereits Gesetze zur Gewährleistung von Mindestgeräuschpegeln. 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 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 essentielle 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)

Olaf Elsen

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 Hoch-Volt-Batterie, nach heutigem Entwicklungsstand ein Lithium-Ionen-Batteriepaket mit einer Nenngleichspannung zwischen 100 und 650 Volt.

Erfahrungen im Umgang mit derart hohen Gleichspannungen 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 20–200 kW sind Ströme von bis zu 400 Ampere zu erwarten. 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. 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 100–650 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 Hoch-Volt-Batterie bis hin zu induktiv gekoppelten Ladegeräten. Zudem gibt es außerhalb vom Fahrzeug konduktive Wechselspannungs- und Gleichspannungsladestationen.

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.

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 daher immer komfortabler und sicherer. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die vielen elektronischen Einrichtungen, wie ABS, ESP, e-Gas, Navigationssystem, Abstandkontrollsystem oder Airbagsteuerung, nicht gegenseitig in ihrer Funktion beeinflussen. 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

Abb. 5.18 EMV-Anforderungen steigen mit dem Integrationsgrad



Typenzulassung (e1, CE) 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).

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 2006/28/EG liegen.

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 getriebene 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. Als weiteres Hilfsmittel dient die Modellierung und Simulation der Komponenten und des Gesamtsystems. 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) 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.



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 2.100 Einzelleitungen und 3.800 m Länge Bordnetz und mehr als 60 Steuergeräten an 3 Bussystemen mit mehr als 2.500 Signalen
2008	Serienstart des Tesla Roadster Elektrosportwagens 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

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 Fahrzeugentwicklungsgeschichte 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 2014 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. 5.20 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.

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.

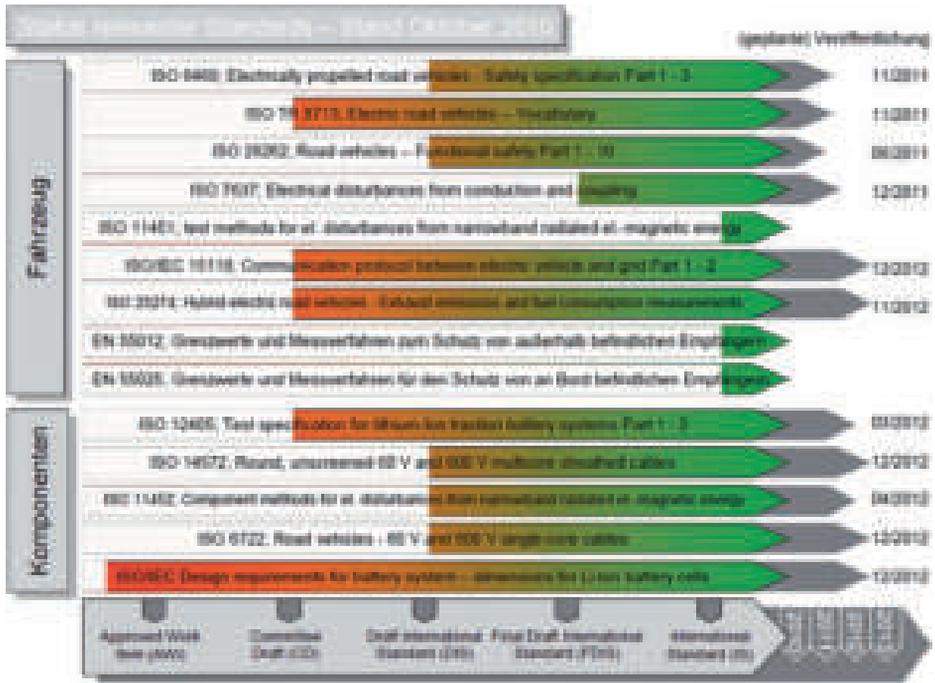


Abb. 5.21 Status der wichtigsten Normungsprojekte von Elektrofahrzeugen. Quelle NPE (2010)

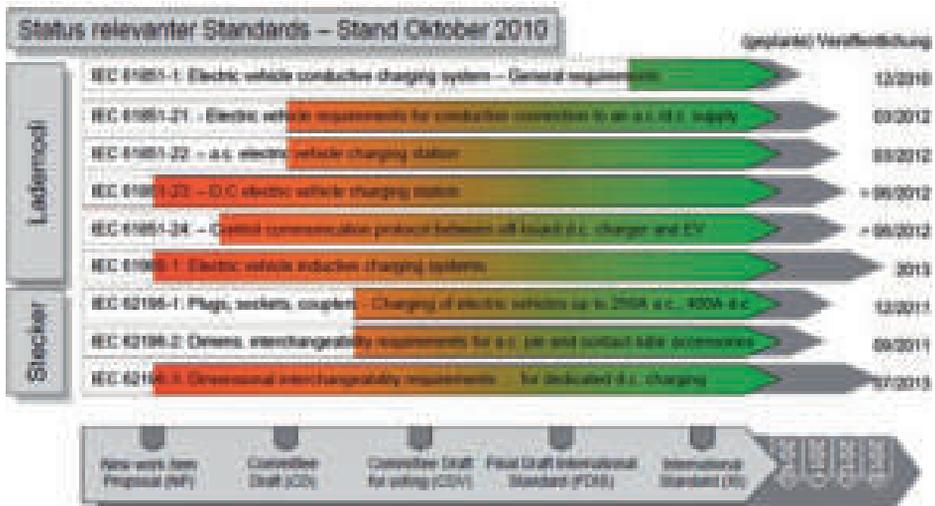


Abb. 5.22 Status der wichtigsten Normungsprojekte von Ladestationen. Quelle NPE (2010)

5.4.2.3 EMV-Design

Innerhalb der Elektromobilität werden immer mehr elektrische und elektronische Komponenten (elektrischer Antrieb, Frequenzumrichter, Hoch-Volt-Batterie) 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).

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

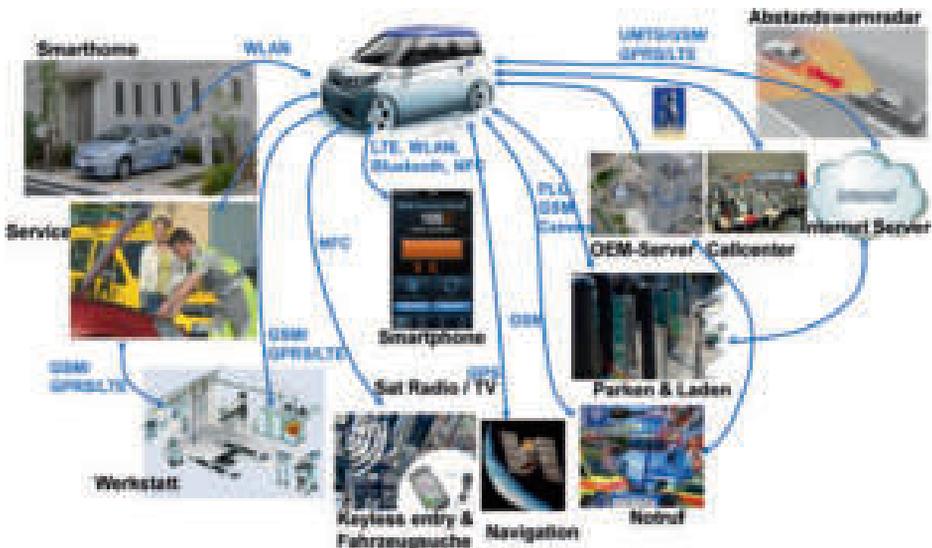


Abb. 5.23 Elektromagnetische Umwelt im Kraftfahrzeug

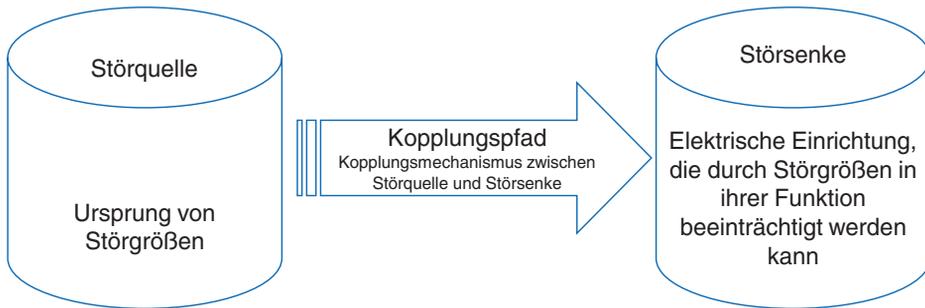


Abb. 5.24 EMV-Beeinflussungsmodell

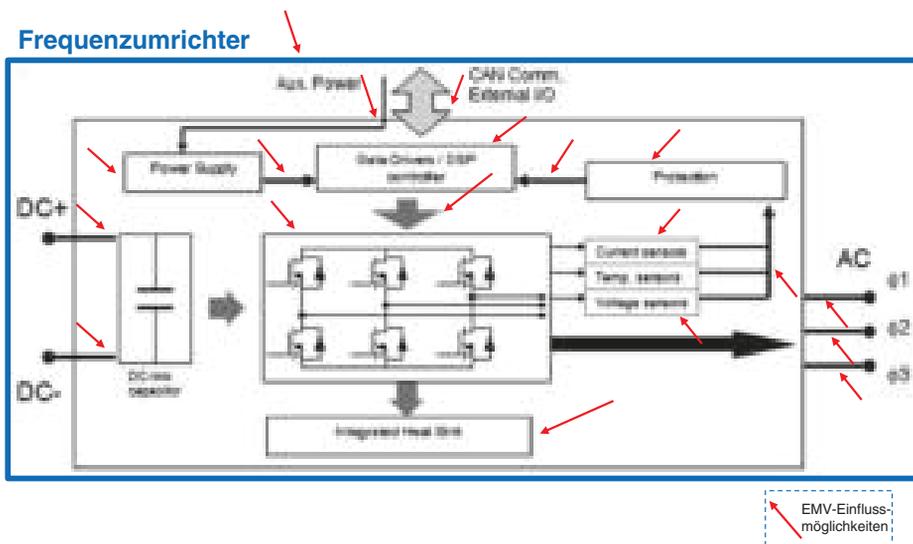


Abb. 5.25 Umrichter, Regelkreis und EMV-Einflussmöglichkeiten

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.

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.

- 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 Störbeführungen 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.

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 Störquelle übertragen und dort bspw. von einem als Antenne fungierenden Leiter empfangen. Auch kapazitive und induktive Beeinflussungen elektrischer bzw. magnetischer Felder werden als feldgebundene Störungen bezeichnet.

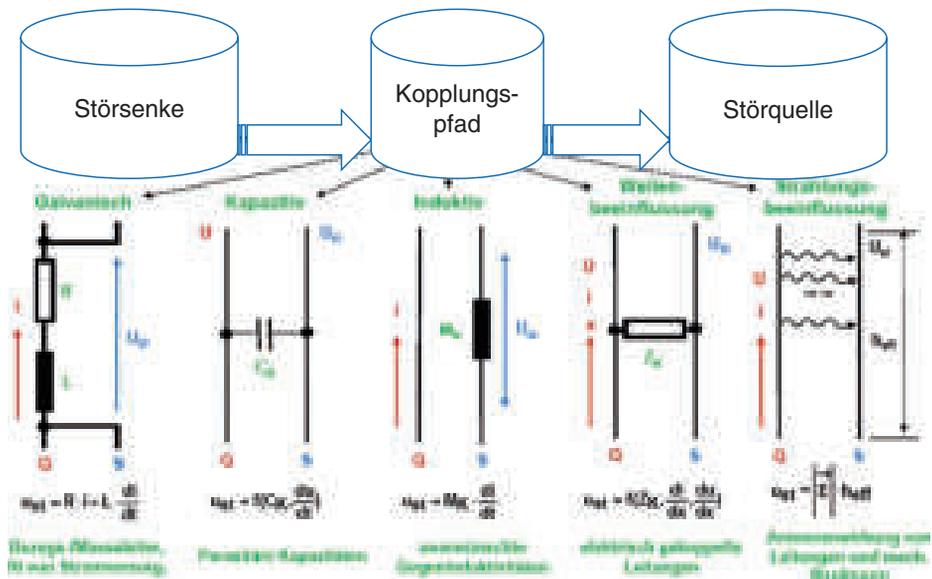
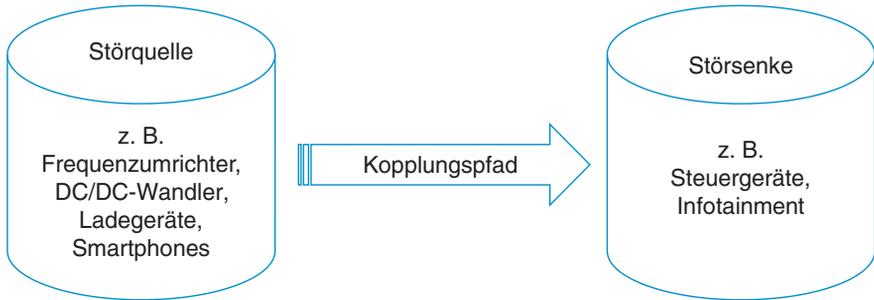


Abb. 5.26 Die verschiedenen Kopplungsmechanismen der Koppelpfade

Tab. 5.4 Störungsphänomene

Kopplungs-mechanismus	Störfestigkeit	Störaussendung
Abgestrahlt	Hochfrequente Feldeinkopplung (V/m)	Nahentstörung (dB μ V)
		Fernentstörung (dB μ V)
Leitungsgeführt	Störimpulsfestigkeit (V)	Störimpulsaussendung (V)
	Elektrostatische Entladung ESD (kV)	



Kontrolle von Störungen
(Störaussendung)
mögliche Maßnahmen:
- Pegel reduzieren
- Ausbreitung verhindern

Kontrolle der Empfindlichkeit
(Störfestigkeit)
mögliche Maßnahmen:
- Einkopplung reduzieren
- Immunität erhöhen

Abb. 5.27 Störquellen und Maßnahmen

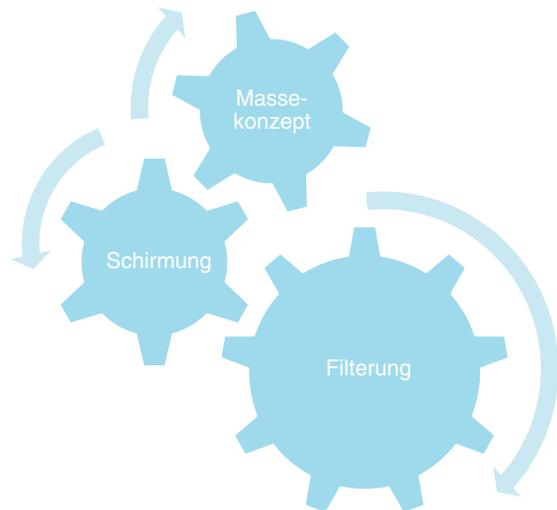
Ein Beispiel für eine feldgebundene Störung ist die Einkopplung einer GSM-Mobiltelefon-Übertragung in eine Audioeinrichtung, bspw. in ein Autoradio. Grund dafür kann ein nicht ausreichend geschirmter Lautsprecher oder ein Kabel sein. Weiterhin ist der Einfluss der Varianten auf die EMV relevant: Varianten wie Sonnendach, Materialien in den Scheiben, unterschiedliche Thermosysteme 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. Tabelle 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.

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

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) 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, von Bauteiltoleranzen sowie Temperaturtoleranzen. 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

Fabian Schmitt

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 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



Abb. 5.29 Gewichtsspirale konventioneller Fahrzeuge (Eckstein et al. 2010)

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. Abbildung 5.31 stellt bisherige und potenzielle zukünftige Leichtbaumaßnahmen in

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

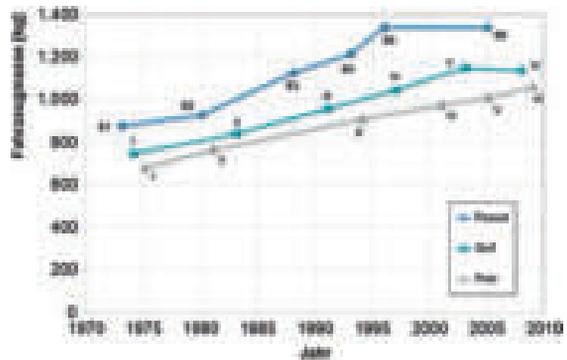
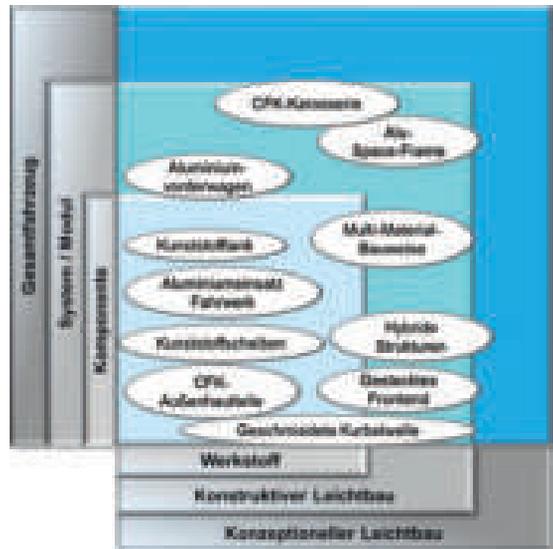


Abb. 5.31 Leichtbaumatrix für konventionelle Fahrzeuge (Eckstein et al. 2010)



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 und OEM 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 1.100 kg ausgewählt und in den Simulationsrechnungen bis zu einer Minimalfahrzeugmasse von 500 kg und einer Maximalmasse von 1.700 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 700–1.700 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

Abb. 5.32 Einfluss der Fahrzeugmasse auf den Energieverbrauch

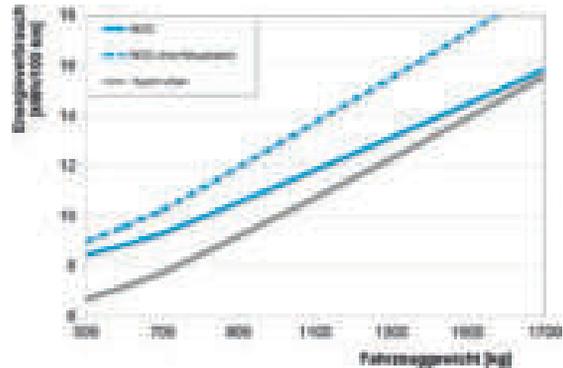
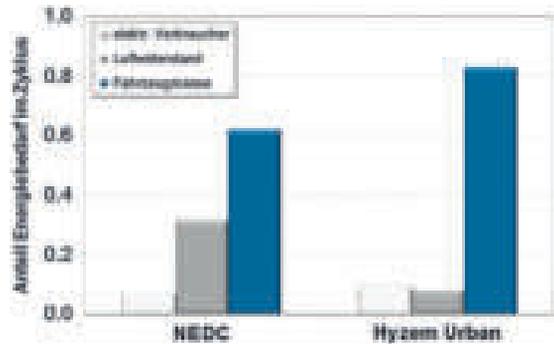


Abb. 5.33 Anteil der Fahrzeugmasse am Energieverbrauch (Eckstein 2010)



das Fahrzeug entsprechend der Auslegungsreichweite und unter Annahme verschiedener Parameter für das Batteriesystem berechnet werden (Abb. 5.33).

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.

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. 1.000 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

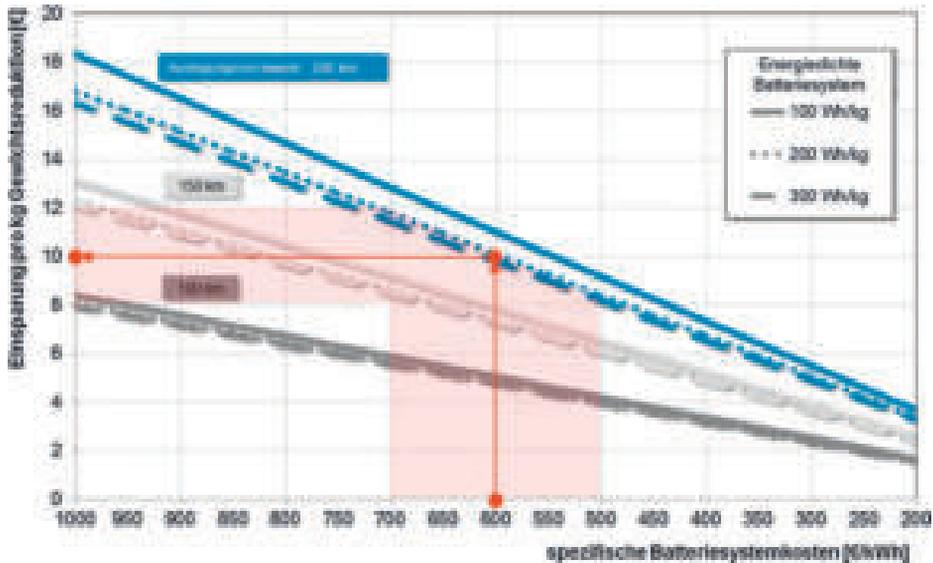


Abb. 5.34 Quantifizierung von wirtschaftlichen Leichtbaumaßnahmen durch Einsparungen im Batteriesystem (Eckstein et al. 2010)

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.

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 Komponenten einstellenden Verteilung der Fahrzeugsystemmassen. Abbildung 5.35 skizziert hierzu den Vergleich eines konventionellen Fahrzeugs des Kleinwagen-Segments mit einem Purpose-Design-Elektrofahrzeug derselben Fahrzeugklasse mit 200 km Reichweite und einer spezifischen Energiedichte

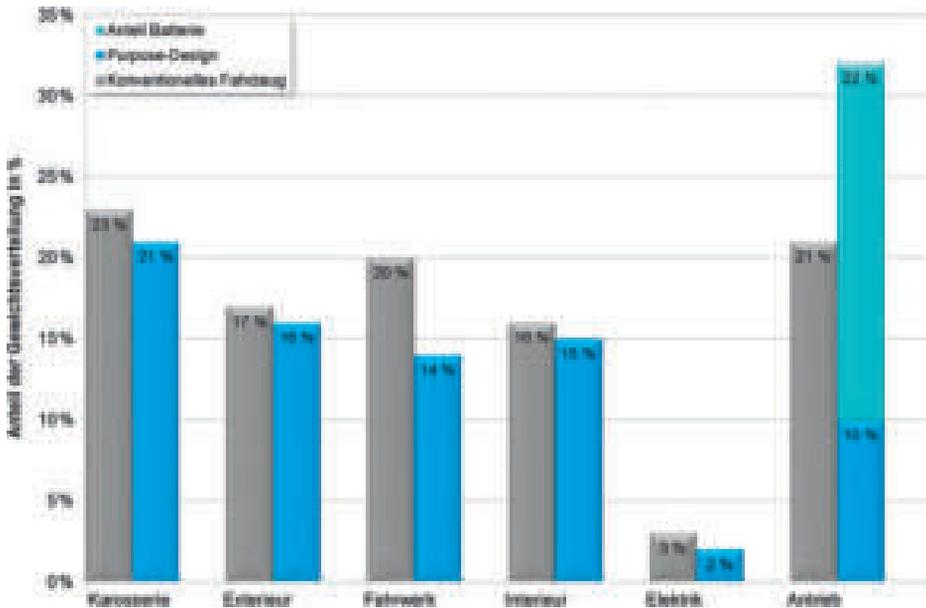


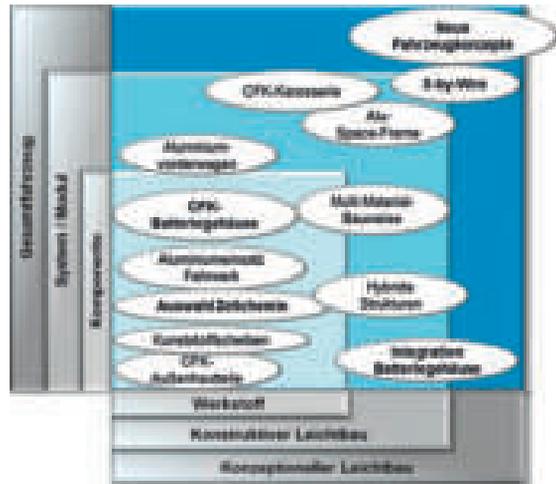
Abb. 5.35 Massenverteilung Vergleich Elektrofahrzeug und konventionelles Fahrzeug nach Fahrzeugsystemen (Eckstein et al. 2010)

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 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. Abbildung 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 naheliegender Ansatz ist die werkstoffgerechte, ein weiterer die Integration mehrerer Funktionen in ein Bauteil (Funktionsintegration). Als Beispiel sei eine Motorhaube aus einem dreidimensional geflochtenen faserverstärkten

Abb. 5.36 Leichtbaumatrix von Elektrofahrzeugen (Eckstein et al. 2010)



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

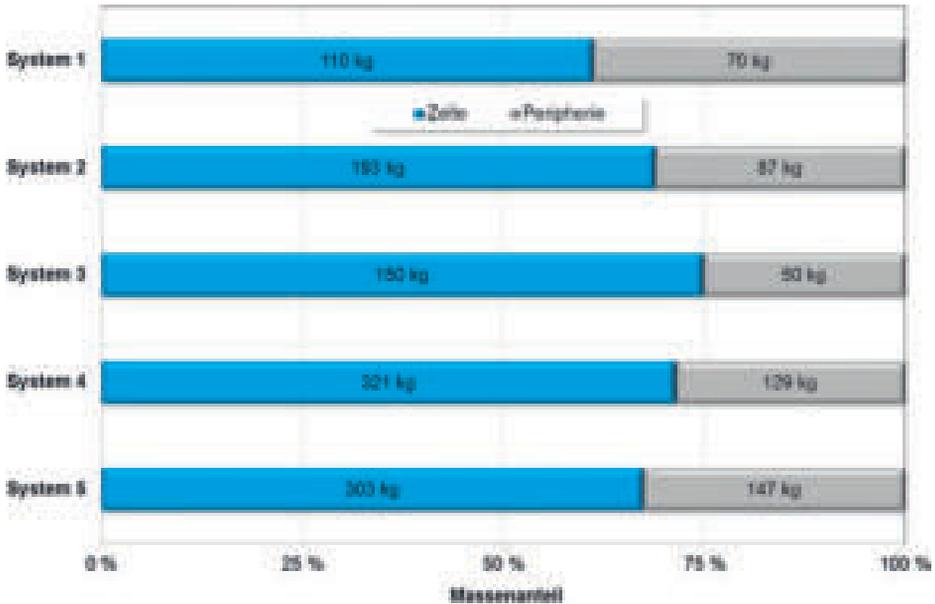


Abb. 5.37 Vergleich Massenanteile Zelle und Peripherie von Batteriesystemen (Eckstein et al. 2010)

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).

Schließlich gilt es, auf Gesamtfahrzeugebene konzeptionellen Leichtbau zu betreiben. Nur so kann eine Fahrzeugmasse deutlich unterhalb der 1.000-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. Abbildung 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

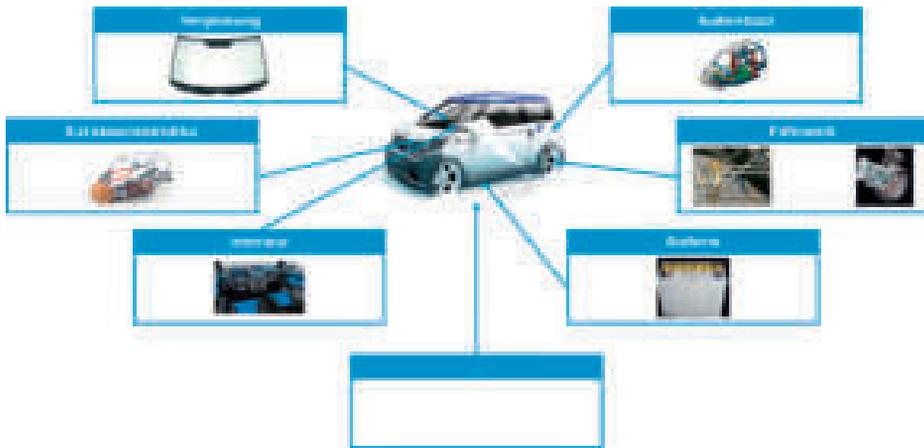


Abb. 5.38 Potenziale Leichtbau im Elektrofahrzeug

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 Leichtbauspirale induziert (s. Abb. 5.39). Im Vergleich zur Gewichtsspirale verstärken sich die Leichtbaumaßnahmen und führen zu einer weiteren Reduktion der Fahrzeugmasse.

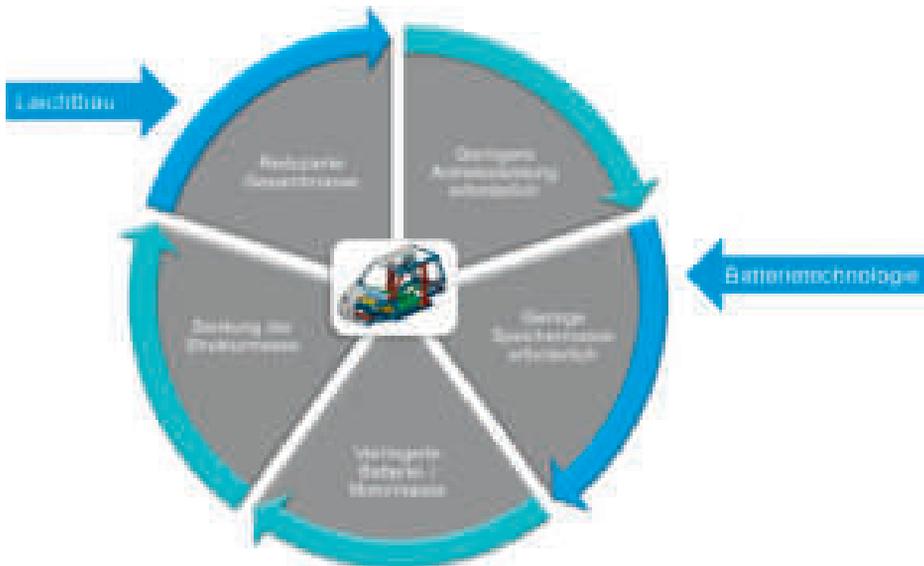


Abb. 5.39 Leichtbauspirale für Elektrofahrzeuge

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

Achim Kampker, Mateusz Swist und Andreas Maue

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 2010a). Außerdem dienen Normen und Standards dazu, Rahmenbedingungen festzulegen, die den Herstellern ein gewisses Maß an Investitionssicherheit bieten (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

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 – Version 1.

5.6.1.1 Zulassung

Die Fahrzeughomologation ist ein überstaatliches System für die Zulassung von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen (vgl. [Kap. 5.1](#)). Sie basiert auf dem „Übereinkommen von 1958“, das im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) 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 [2010b](#)). 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, überarbeitet bzw. weiterentwickelt (Nationale Plattform für Elektromobilität [2010b](#)).

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 [2010a](#)).

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 1.000 V AC bzw. größer 60 V DC bis einschließlich 1.500 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 vorgeschrieben. 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 2010a). 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.). Deutschland und Frankreich haben bereits einen Vorschlag zur Erweiterung der ECE-R 10 „Elektromagnetische Verträglichkeit“ eingereicht (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

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 Elektrofahrzeug-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 2010a).

Für ein langsames Laden des Privatwagens über Nacht in der heimischen Garage ist die Infrastruktur bereits gegeben. Dafür sind 220 V Haushaltsstrom völlig 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 2010a).

Am weitesten vorangeschritten sind die Normungsaktivitäten zum kabelgebundenen Laden, vor allem bei den mechanischen und elektrischen Kennwerten sowie der Signalisierung (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a). 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 und die aktuell noch in Arbeit befindliche Norm ISO/IEC 15118 (Nationale Plattform für Elektromobilität 2010a).

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).



Abb. 5.40 Übersicht Produktentwicklungsprozess (in Anlehnung an 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 [Kap. 3.8](#) 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).

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. Kap. 3.3). Parallel wird das Montageschema entwickelt und die genauen Bedarfsmengen werden bestimmt (Schuh 2006). In diesem Zusammenhang werden mithilfe 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; Hüttel et al. 2010).

Es gibt zahlreiche Parallelen zum Serienanlauf der konventionellen Automobilproduktion, aber neue Herausforderungen bedingen angepasste Handlungsspielräume und -schwerpunkte (Hüttel 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).

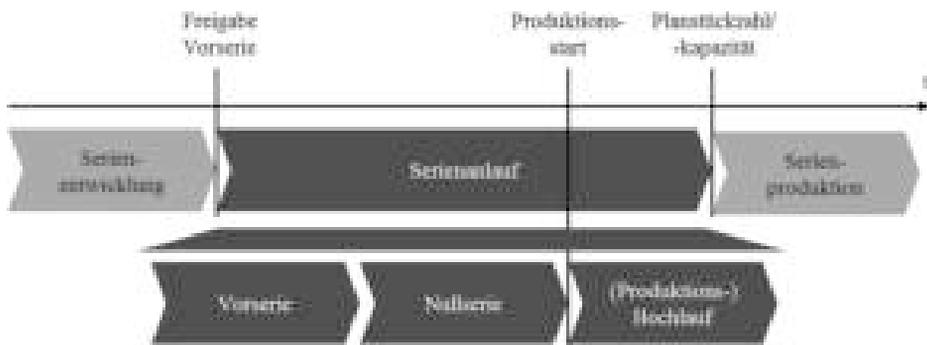


Abb. 5.41 Phasen des Serienanlaufs (in Anlehnung an Gentner 1994; Wangenheim 1998)

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 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 Serienlauf), 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

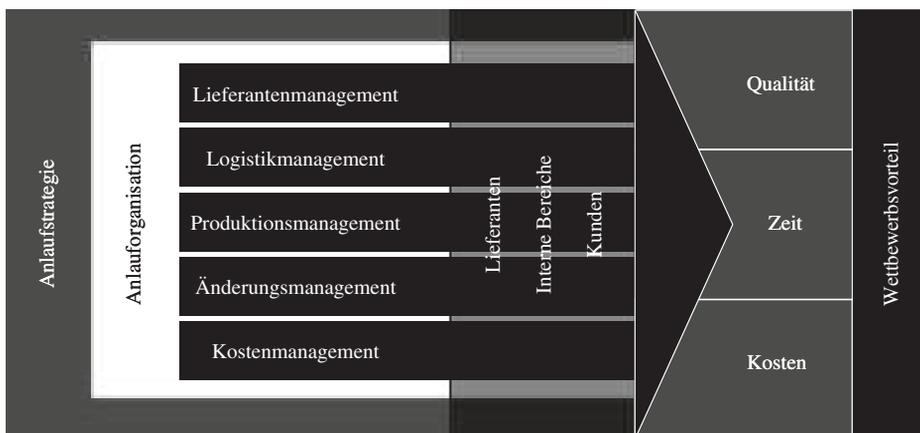


Abb. 5.42 Integriertes Anlaufmanagementmodell (in Anlehnung an Schuh et al. 2008)

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).

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 unbekanntes 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 (Fitzek et al. 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 geliefert (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 geliefert 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 Elektromobilproduktion. 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 Elektromobilproduktion 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. Die Batterieproduktion stellt aber 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. Kap. 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. Kapazität und Lebensdauer sind noch beschränkt und Herstellprozesse nicht ausgereift und zugleich kostenintensiv (Hüttl et al. 2010).

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).

5.7 Recycling als Teil der Wertschöpfungskette

Bernd Friedrich, Matthias Vest, Tim Georgi-Maschler und Honggang Wang

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, b). 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 Vertreter oder bei den von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern eingerichteten Erfassungsstellen abzugeben. Eine Entsorgung im Hausmüll ist für alle Batterietypen verboten. Die Hersteller und Vertreter 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 2009).

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. 5.6 aufgelistet.

Tab. 5.6 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	+ Nutzung der unedlen Metalle, der organischen Komponenten und des Kohlenstoffs als Reduktionsmittel bzw. als Energieträger
	+ geringe Abgasmengen	+ absatzfähige Metalle als Recyclingprodukte
	+ hohe Selektivität	+ hohe Raum-Zeit-Ausbeute
Nachteile	– Umgang mit großen Mengen an Chemikalien (Laugen, Säuren, Fällungsmittel usw.)	– große Mengen an Brennstoffen oder elektrischer Energie notwendig
	– geringe Raum-Zeit-Ausbeute	– aufwendige Abgasreinigung notwendig
	– große Mengen an Abwasser und Schlämmen	

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.

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 infrage 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 nichtmetallische 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. 5.43).

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



Abb. 5.43 Beispiel für händisches Batterierecycling in China (links) und Indien (rechts). *Quelle* BAN (2009), Süddeutsche Zeitung (2007)

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; Tedjar 2006; European Commission 2009; Tedjar 2008; Tedjar 2003; 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. 5.44. 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 2009; Wissman 2008; Krebs 2002, 2003, 2006).

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



Abb. 5.44 Mechanische Aufbereitung bei Batrec. *Quelle* Batrec Industrie AG (2009)

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 flüsigem 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; Coy 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. 1.350 °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



Abb. 5.45 Legierungsabstich aus dem LBO bei Inmetco. *Quelle* Inmetco Inc. (2009)

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 eingeschmolzen (s. Abb. 5.45). 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 abgetragen. 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 Primärgewinnungsrouten

Lithium-Ionen-Batterien können auch durch Einbringen in die Primärgewinnungsrouten 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 Primärgewinnungsrouten 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 Nickelgehalte der Batterien ab. Alle übrigen Materialgehalte 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; Henrion 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 7.000 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 Graphit 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, hydrometallurgisch weiterverarbeitet. Das Granulat wird gelaugt. Die gewonnene

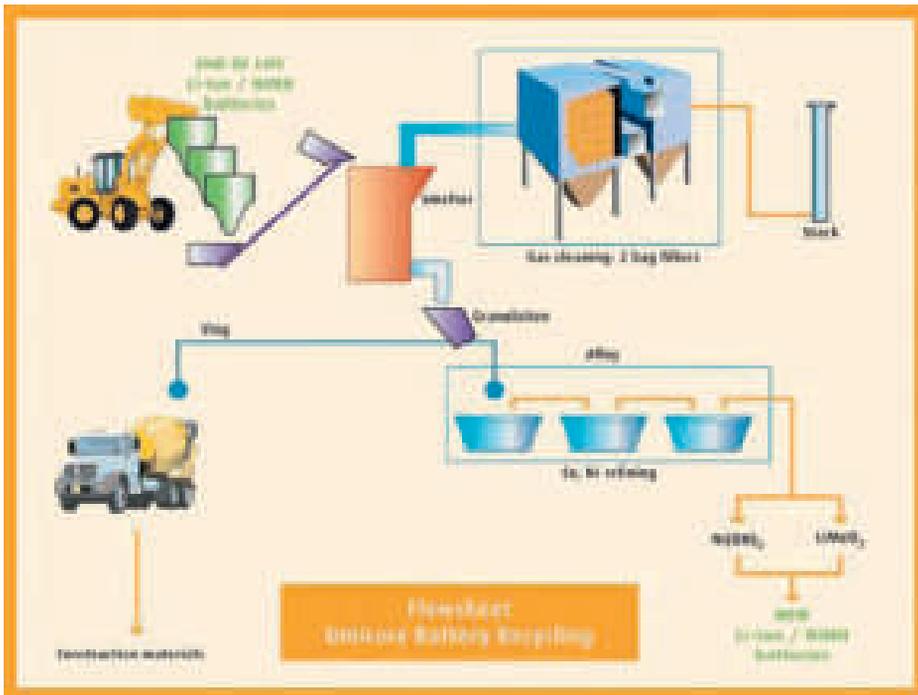


Abb. 5.46 Schematische Darstellung des Umicore-Recyclingprozesses. *Quelle* Umicore (2010)

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. 5.46 zeigt schematisch den Umicore-Recyclingprozess. Laut den Aussagen von Umicore kann so eine Recyclingeffizienz von 64,6 % erreicht werden (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 pyro-metallurgischer Prozessschritte kombiniert.

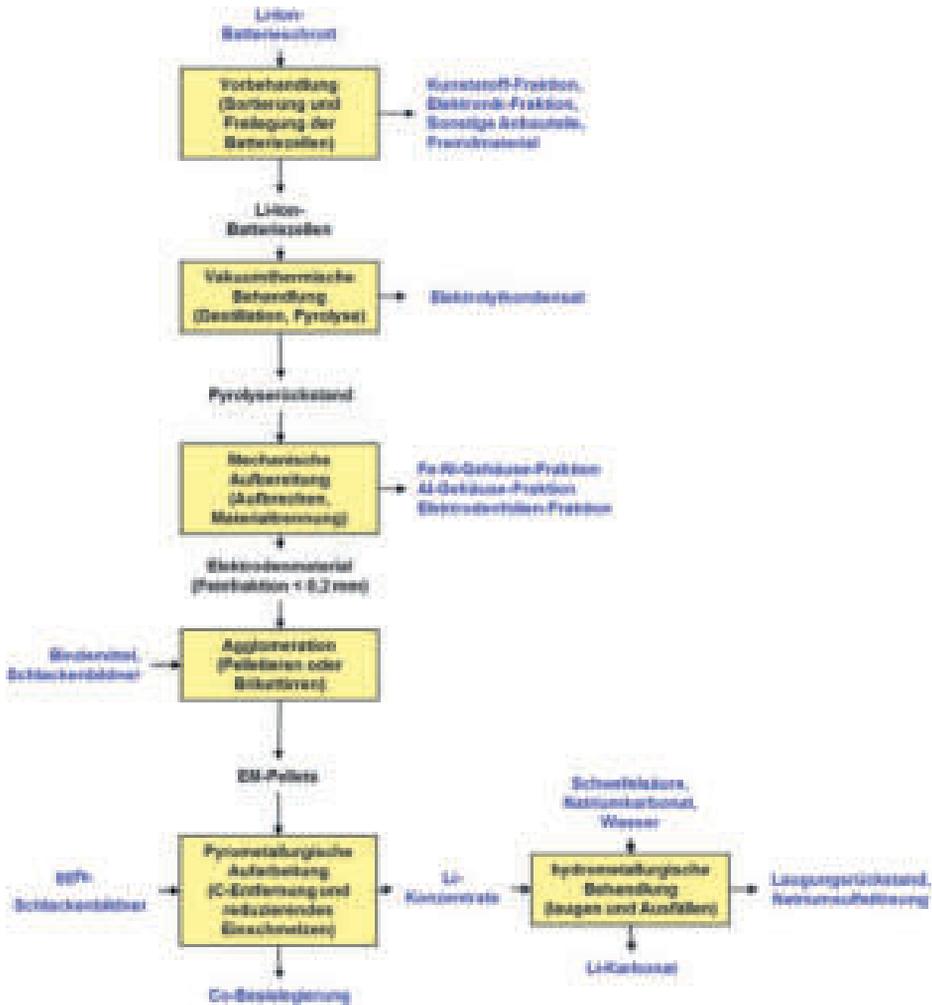


Abb. 5.47 Alternatives Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien. *Quelle* Georgi-Maschler (2011)

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. 5.47.

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

Literatur

- Adam Opel AG (2012) Die Batterie des Opel Ampera. <http://www.opel.de/fahrzeuge/modelle/personenwagen/ampera/highlights/technology.html>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Afonso JC (2006) Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Audi AG (2012) Bildmaterial Elektromobilität, Audi AG. <https://www.audi-mediaservices.com/publish/ms/content/de/public.html>. Zugegriffen: 16. Feb 2012
- BAN – The Basel Action Network (2009). <http://www.ban.org>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Batrec Industrie AG (2009) Internetauftritt des Unternehmens. <http://www.batrec.ch>. Zugegriffen: 2. Juni 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>. Zugegriffen: 2. Juni 2009
- Baumgarten H, Risse J (2001) Logistikbasiertes Management des Produktentstehungsprozesses. In: Hossner R (Hrsg) Jahrbuch der Logistik. Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, S 150–156
- Bille S et al (2011) (UNITY-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 Heft 2:46–54
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2001) Informationen zur Batterieverordnung vom 03.07.2001, Bonn, Berlin. <http://www.bmu.de>. Zugegriffen: 12. May 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. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02–04 June 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. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Montreux, 02–04 May 2001
- Coy TR (2006) Recycling Ni, Co and Cd from batteries in the United States. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Czichos H, Hennecke M (2004) Hütte, das Ingenieurwissen. Springer, München

- David J (1999) New recycling technologies of rechargeable batteries. In: International battery recycling congress, Deauville, 27–29 Sept 1999
- Deinzer G H (2009) Die Karosserie birgt das größte Potenzial. In: Automobilwoche, Okt 2009
- Deutekom Hv (2004) Safety aspects of waste lithium batteries. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- 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. In: 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>
- Erläuterungen zur Anwendung der Normenreihe DIN IEC 60664 (2008). <https://www.dke.de/de/DKEArbeit/MitteilungenzurNormungsarbeit/2008/Seiten/Erlaeuterungen%20zur%20Anwendung%20der%20Normenreihe%20DIN%20IEC%2060664.aspx>
- Espinosa DC et al (2004) An overview on the current processes for the recycling of batteries. J Power Sources 135(1–2):311–331
- EU (1997) Beschluss der Europäischen Union 97/836/EG. <http://eurlex.europa.eu/Notice.do?mode=dbl&lang=de&ihmlang=de&lng1=de,et&lng2=cs,da,de,el,en,es,et,fi,fr,hu,it,lt,lv,mt,nl,pl,pt,sk,sl,sv,&val=412256:cs&page=>
- EU (2000) Beschluss der Europäischen Union 2000/125/EG. http://eurlex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=de&type_doc=Decision&an_doc=2000&nu_doc=125
- EU (2007) Zusammenfassungen der EU-Gesetzgebung: Die globale technische Harmonisierung von Fahrzeugen. http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/motor_vehicles_technical_harmonisation/l24471_de.htm
- European Commission (2009) Recycling of primary and secondary lithium batteries. Record Control Number 51959, Informationen zum VALIBAT-Projekt. <http://ec.europa.eu/>. Zugegriffen: 25. Mai 2009
- Eversheim W (1996) Organisation in der Produktionstechnik, Bd 1 (Grundlagen). VDI-Verlag, Düsseldorf
- Eversheim W (2006) 100 Jahre Produktionstechnik. Springer, Berlin
- Eversheim W, Schuh G (1999) Produktion und Produktentwicklung – Produktmanagement. 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 Geräuschszenarien. 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 JL (2009) Jahresbericht/Dokumentation 2008 – Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung gemäß §10 BattV. GRS – Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg), Hamburg
- Future Steel Vehicle, World Auto Steel (o. J.) <http://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Gavinet C (1999) 6 Years experience in lithium battery recycling. In: International battery recycling congress, Deauville, 27–29 Sept 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/inhaltssite200606.html. Zugegriffen: 16. Mai 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. In: 5. SNVH Kongress, Graz, Österreich

- Genuit K (2011) Warnsignale für leise Fahrzeuge – im Spannungsfeld zwischen Lärm (Emission) und Sicherheit. In: Automotive Acoustics Conference, 1. Internationale ATZ-Fachtagung, Zürich, Schweiz, Juli 2011
- Genuit K (Hrsg) (2010) Sound-Engineering im Automobilbereich. Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer, Heidelberg
- Genuit K et al (1997) Binaural “Hybrid” model for simulation of noise shares in the interior of vehicles. Inter-Noise 1997, Budapest, Ungarn
- 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
- Georgi-Maschler T (2011) Entwicklung eines Recyclingverfahrens für portable Li-Ion-Gerätebatterien. Dissertation, RWTH Aachen University, Shaker-Verlag
- Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegelgesetz – BattG) vom 25.06.2009 (BGBl. I Nr. 36 vom 30.06.2009 S. 1582)
- 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. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen
- Göpfert J (1998) Modulare Produktentwicklung. Gabler, Wiesbaden
- Göpfert J, Steinbrecher M (2000) Modulare Produktentwicklung leistet mehr. *Harvard Bus Manager* 3:20–32
- Grabner J, Nothhaft R (2006) Konstruieren von PKW-Karosserien. Springer, Berlin
- 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
- Honda K, Yoshida H (2007) Development of next-generation electric vehicle “i-MiEV”. Mitsubishi Motors Technical Review 19, Mitsubishi Motors Corporation. http://www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/index.html. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Hardies AC (2008) High temperature metal recovery from spent batteries. In: EBR – Electronics & Battery Recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Hauck U (o. J.) Standardisierung ist das Gebot der Stunde. <http://www.e-auto-industrie.de/energie/articles/295685>
- Henrion P (2004) Battery recycling – a perspective from a nickel and cobalt producer. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- Henrion P (2008a) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. In: EBR—electronics & battery recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Henrion P (2008b) Recycling Li-ion batteries at Xstrata Nickel. In: ICBR—international congress for battery recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Hefß 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>
- Hurtado MDRF (2005) Method of recovering lithium ion batteries LG cellphone. In: ICBR—international congress for battery recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 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 unter. <http://www.inmetco.com>. Zugegriffen: 17. Juli 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
- KBA (2009) Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern. Stand April 2009, SV 1. Kraftfahrt-Bundesamt
- 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
- Kraftfahrt-Bundesamt (o. J.) Genehmigungen nach harmonisierten Vorschriften (Globale technische Regelungen). http://www.kba.de/nn_124996/DE/Fahrzeugtechnik/Typgenehmigung/GlobaleTechnischeRegelungen/globaletechnischeregelungen__node.html?__nnn=true
- Krebs A (2002) Batrec process for spent Li-batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Wien, 03–05 July 2002
- Krebs A (2003) Batrec news – industrial recycling of spent lithium batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling. Lugano, 18–20 June 2003
- Krebs A (2005) About lithium batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 2005
- Krebs A (2006) Latest developments at Batrec. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Interlaken, 28–30 June 2006
- Krust M (2011) Daimler und Bosch wollen Produktion von E-Motoren 2012 starten. *Automobilwoche*. <http://www.automobilwoche.de/article/20110412/REPOSITORY/110419992/1139>
- Kuhn A et al (2002) „fast ramp-up“ – Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Verlag Praxiswissen, Dortmund
- 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 LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries. *J Power Sources* 109(1):17–21
- Li J et al (2007) Preparation of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ cathode materials from spent Li-ion batteries. *Trans Nonferrous Met Soc China* 17(5):897–901

- Lindemann U, Reichwald R (1998) Integriertes Änderungsmanagement. Springer, Berlin
- Lupi C et al (2005) Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical process. *Waste Manage* 25(2):215–220
- Lupi C, Pasquali M (2003) Electrolytic nickel recovery from lithium-ion batteries. *Miner Eng* 16(6):537–542
- 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. Sept 2008
- Michelin (2004) Michelin active wheel. <http://www.michelin.com/corporate/EN/news/article?articleID=N13730>. Zugegriffen: 10. Juli 2012
- Miller DG, McLaughlin B (2001) Recycling the lithium battery. In: Pistoia G et al (Hrsg) *Used battery collection and recycling*, Elsevier Science, New York
- Möller K (2002) Lebenszyklusorientierte Planung und Kalkulation des Serienanlaufs. *Z Plan* 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 (2010a) Die deutsche Normungsroadmap: Elektromobilität – Version 1. <http://www.dke.de/de/infocenter/Seiten/ArtikelDetails.aspx?eslShopItemID=99bf66a4-ea6a-4839-a174-593a29ccce33>
- Nationale Plattform für Elektromobilität (2010b) 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
- 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 (2010) Die deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität. Version 1, 30 Nov 2010
- Onto Technology LLC (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.onto-technology.com>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Parametric Technology GmbH (2012) Definition of an integral architecture for a virtual development – PLM Solution StreetScooter
- Patent Application US 20050244704 (2005) System and method for processing an end-of-life or reduced performance energy storage and/or conversion device using a supercritical fluid. USA, 03 Nov 2005
- Patent EP 20000108070 (2000) Procedure for the recycling of cathode masses of used lithium batteries. Europa, 29 Nov 2000
- Patent JP 2000015216 A (2000) Method for recycling positive electrode active material from lithium ion secondary battery. Japan, 18 Jan 2000
- Patent JP 2000173677 A (2000) Lithium battery processing method for recycling constituent material. Japan, 23 June 2000
- Patent JP 2000231941 A (2000) Recycling method of positive electrode for lithium ion secondary battery. Japan, 22 Aug 2000

- Patent JP 2001023704 A (2001) Recycling method of negative electrode material from used lithium battery. Japan, 26 Jan 2001
- Patent US 5352270 (1994) Method for recycling metal containing electrical components. USA, 04 Oct 1994
- Patent US 5491037 (1996) Method for recovering lithium cell materials. USA, 13 Feb 1996
- Patent US 5523516 (1996) Method for recycling lithium batteries. USA, 04 June 1996
- Patent US 5575907 (1996) Process for the recovery of raw materials from presorted collected waste, especially scrap electrochemical batteries and accumulators. USA, 19 Nov 1996
- Patent US 5882811 (1999) Method for recovering lithium cell materials. USA, 16 Mar 1999
- Patent US 5888463 (1999) Li reclamation process. USA, 30 Mar 1999
- Patent US 6048646 (2000) Method for treating copper current collectors for Li-ion and/or Li-ion polymer batteries. USA, 11 Apr 2000
- Patent US 6120927 (2000) Method of recovering lithium from batteries. USA, 19 Sept 2000
- Patent US 6261712 (2001) Method of reclaiming cathodic active material of lithium ion secondary battery. USA, 17 July 2001
- Patent US 6514311 (2003) Clean process of recovering metals from waste lithium ion batteries. USA, 04 Feb 2003
- Patent US 6835228 (2004) Process of recovering valuable metals from waste secondary batteries. USA, 28 Dec 2004
- Patent US 7119517 (2006) Method for recycling secondary battery. USA, 10 Oct 2006
- Patent US 7192564 (2007) Method for recycling spent lithium metal polymer rechargeable batteries and related materials. USA, 20 Mar 2007
- Patent WO 02/23651 A (2002) A method for recycling spent lithium metal polymer rechargeable batteries and related materials, international. 21 Mar 2002
- Peters A, Hoffmann J (2011) Forschungsbericht Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Fraunhofer ISI. http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Ergebnisbericht_Fokusgruppen_2011_tcm243-92030.pdf
- Pfohl HC, Gareis K (2000) Die Rolle der Logistik in der Anlaufphase. Z Betriebswirtsch 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>. Zugegriffen: 5. Juni 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. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Montreux, 02–04 May 2001
- Rosenberg A (2004) Multi batteries non sorted recycling technology through hydrometallurgy. In: ICBR—international congress for battery recycling, Como, 02–04 June 2004
- RWTH Aachen (2009) Konzeptphase Projekt StreetScooter, erster Grobpackageentwurf
- S.N.A.M. (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.snam.com>. Zugegriffen: 5. Juni 2009
- Sagawe T (2010) Sicherheit der Hochvolttechnik bei Elektro- und Hybridfahrzeugen. http://www.sachverstaendigentag21.de/downloads/6_Sagawe.pdf

- Sandberg U et al (2010) Are vehicles driven in electric mode so quiet that they need acoustic warning signals. ICA 2010, Sydney, Australien
- 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/>
- 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 Werkstattstechnik online 92(10):514–518
- Schönfelder M et al (2009) Elektromobilität – Eine Chance zur verbesserten Netzintegration Erneuerbarer Energien. In: uwf – UmweltWirtschaftsForum, Bd 17, Nr 4, pp 373–380
- Schuh G (2006) Produktionsplanung und Steuerung. Springer, Berlin
- Schuh G et al (2005) Anlaufmanagement – Kosten senken, Anlaufzeit verkürzen Qualität sichern. wt Werkstattstechnik (online) 95(5):405–409
- Schuh G et al (2008) Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Springer, Berlin
- Schulte-Fortkamp B et al (2006) New approach for the development of vehicle target sounds. Internoise 2006, Honolulu, HI, USA
- Seidel M (2005) Methodische Produktplanung. Universitätsverlag, Karlsruhe
- Sellerbeck P, Nettelbeck C (2010) Verbesserung des Geräusch- und Schwingungskomforts von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: Aachener Akustik Kolloquium 2010, Aachen
- Shin S-M et al (2005) Development of a metal recovery process from spent Li-ion battery wastes. Hydrometallurgy 797(3–4):172–181
- Siret C (2008) Comprehensive life cycle assessments of rechargeable batteries. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Siret C et al (2006) Recycling or direct metal production: a comprehensive life cycle analysis from metals to batteries. Poster der Unternehmen Saft und Umicore. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Siret C, Van Damme G (2008) Umicore and SAFT closing the battery loop – Recycling lowers environmental impact: The case of Li-ion batteries. In: EBR – Electronics & Battery Recycling, Toronto, 03–06 June 2008
- Sloop SE (2008) Advanced battery recycling. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Sohn J-S (2003) Collection and recycling of spent batteries in Korea. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18–20 June 2003
- Sohn J-S et al (2006) Hydrometallurgical approaches for selecting the effective recycle process of spent lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy RG (Hrsg) Sohn international symposium, advanced processing of metals and materials. New, improved and existing technologies: aqueous and electrochemical processing, Bd 6, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)
- 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
- 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

- 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. Dez 2007
- Tedjar F (2003) Challenge for recycling new batteries and fuel cells. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Lugano, 18–20 June 2003
- Tedjar F (2005) Recupyl process for recycling lithium ion battery. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Barcelona/Sitges, 08–10 June 2005
- Tedjar F (2006) Recupyl process for recycling lithium ion battery. In: Kongoli F, Reddy RG (Hrsg) Sohn international symposium on advanced processing of metals and materials. New, improved and existing technologies: iron and steel and recycling and waste treatment, Bd 5, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)
- Tedjar F (2008) From portable batteries to hybrid vehicle and electrical vehicles batteries – extension of Recupyl process. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Düsseldorf, 17–19 Sept 2008
- Thomke S, Fujimoto T (2000) The effect of “Front-Loading” problem-solving on product development performance. *J Prod Innov Manage* 17:128–142
- Thompson S (2004) Recycling HEV batteries in the US. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Como, 02–04 June 2004
- Tollinsky N (2009) Xstrata boosts recycling capacity. *Sudbury Min Solutions J* 5(2):1 und 36. <http://www.sudburyminingsolutions.com>. Zugegriffen: 2. Juni 2009
- Toxco Inc. (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.toxco.com>. Zugegriffen: 17. Juli 2012
- Ulrich K, Eppinger SD (2000) Methodologies for product design and development, 2. Aufl. McGraw-Hill, New York
- Umicore Recycling Solutions (2004a) Closing the loop for Li-ion batteries – patented recycling process that fulfills a market need. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 8 Dez 2004
- Umicore Recycling Solutions (2004b) Going green with Umicore – a global metals and materials company that adopts a dedicated professional approach to battery recycling with its VAL'EAS process. *Batteries Int* 60:42–44
- Umicore Recycling Solutions (2006a) Battery to battery – excellence in battery materials and battery recycling. Poster des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006b) Recycling of new generation rechargeable batteries. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006c) The Val'Eas process: Recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial closed loop. Prozessbeschreibung des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2006d) Umicore – excellence in battery materials and battery recycling. Marketingbroschüre des Unternehmens. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2006
- Umicore Recycling Solutions (2008) Umicore's closed loop solution for rechargeable batteries. Umicore battery recycling presentation, Stand 2008
- Umicore Recycling Solutions (2009) Internetauftritt des Unternehmens unter. <http://www.batteryrecycling.umicore.com>. Zugegriffen: 6. Juni 2009

- Umicore: Artikel (2010) The Umicore process: recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial closed loop. www.batteryrecycling.umicore.com. Zugegriffen: 31. Aug 2011
- 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
- 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. In: ICBR – International Congress for Battery Recycling, Wien, 03–05 July 2002
- Wiesinger G, Housein G (2002) Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Wettbewerbsvorteile durch ein anforderungsgerechtes Anlaufmanagement. wt Werkstatttechnik 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, Bonn, Germany
- Zanner S et al (2002) Änderungsmanagement bei verteilten Standorten. Ind Manage 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. Zugegriffen: 16. Feb 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