



# AELFA Endbericht

Im Auftrag des Ministeriums  
für Finanzen und Wirtschaft  
Baden-Württemberg

Strukturanalyse von  
Automobilkomponenten für  
zukünftige elektrifizierte  
Fahrzeugantriebe



**DLR** Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

# AELFA

## Endbericht

Strukturanalyse von Automobilkomponenten  
für zukünftige elektrifizierte Fahrzeugantriebe

### **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte

Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich

Pfaffenwaldring 38-40  
D-70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711/6862-256  
Fax : +49 (0)711/6862-258

Horst.Friedrich@DLR.de

Dr.-Ing. Stephan A. Schmid

Pfaffenwaldring 38-40  
D-70569 Stuttgart

+49 (0) 711/6862-533  
+49 (0) 711/6862-258

Stephan.Schmid@DLR.de

## Vom Land des Automobils zum Land der Mobilität

Noch hat sich der Massenmarkt für Elektromobilität weltweit nicht entwickelt. Fakt ist aber, dass es in den kommenden Jahren einen massiven Markthochlauf geben wird und die deutsche Industrie angesichts des wachsenden internationalen Wettbewerbsdrucks schnell große Herausforderungen bewältigen muss. Das gilt gerade für das Automobilland Baden-Württemberg, mit seinen Fahrzeugherstellern mit Weltruf, seiner mittelständischen Zulieferindustrie und den Fabrikanlagenherstellern.

Im Kern der Anstrengungen in Baden-Württemberg im Bereich der Elektromobilität steht das Realisieren von vernetzter Mobilität auf Basis regenerativer Energien. Die große Zahl bereits laufender Aktivitäten im Bereich der Forschung und Entwicklung gilt es in den kommenden Jahren intensiv fortzusetzen und dabei vor allem die Bereiche Batterie, Brennstoffzelle, Elektromaschinen, Leistungselektronik aber auch Fahrzeuggestaltung, Einbindung von Fahrzeugen in elektrische Netze sowie die Produktionstechnologie elektromobiler Komponenten in den Blick zu nehmen.



Auf Basis der vielfältigen Forschungsaktivitäten müssen wir verstärkt aus den Laboren in die Produktion kommen und sukzessive das in der Forschung erarbeitete Know-how zur Anwendung bringen. Die AELFA Strukturanalyse bietet wichtige Orientierung im Transferprozess hin zu elektromobilen Fahrzeugen mit der Analyse von Komponenten und Gesamtfahrzeugkonzepten. In Szenarien werden mögliche Markthochläufe aufgezeigt.

Die Geschwindigkeit der Marktdurchdringung von Fahrzeugen mit effizienteren Verbrennungsmotoren sowie mit neuen Antriebsformen (Hybride, batterieelektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge) ist entscheidend dafür, wie schnell global gesehen die Emission von CO<sub>2</sub> reduziert werden kann. Elektromobilität bietet neben seiner ökologischen Zielsetzung aber auch enorme ökonomische Chancen. Die vielen neuen Komponenten besitzen hohes Wertschöpfungspotenzial, so dass Baden-Württemberg optimale Chancen hat, auch zukünftig eine wichtige Produktionsregion für Hochtechnologiemodule von Verbrennungsfahrzeugen, Elektrofahrzeugen und vernetzter Mobilität zu sein.

Die Anforderungen an intelligente und umweltfreundliche Mobilitätslösungen insgesamt werden steigen. Baden-Württemberg ist als starker Wirtschafts- und exzellenter Forschungs- und Wissenschaftsstandort gut aufgestellt, um auf diese Herausforderungen überzeugende Antworten zu finden, die den Erhalt von Lebensraum, ökonomische Interessen und neue Kundenwünsche gleichermaßen in Einklang bringen werden.



**Franz Loogen,**  
Geschäftsführer der e-mobil BW GmbH  
Landesagentur für Elektromobilität und  
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg

**e-mobil** BW  
Landesagentur für Elektromobilität und  
Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH

# Inhalt

INHALT .....	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	7
TABELLENVERZEICHNIS .....	11
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	12
1 MOTIVATION FÜR DIE STUDIE UND VORGEHEN .....	13
2 ELEKTRIFIZIERTE FAHRZEUGKONZEPTE .....	15
<b>2.1 Heutige elektrifizierte Antriebskonzepte .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Hybridfahrzeuge .....	15
2.1.2 Elektrifizierte Fahrzeuge zum Anschluss an das Stromnetz .....	17
2.1.3 Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge .....	19
<b>2.2 Einflussfaktoren auf zukünftige Fahrzeugkonzepte .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 Rahmenbedingungen für den Individualverkehr mit dem Pkw .....	21
2.2.2 Entwicklung des Mobilitätsverhaltens .....	22
<b>2.3 Fahrzeugkonzepte und Markt – Ergebnisse aus den Workshops .....</b>	<b>25</b>
3 ANALYSE VON ANTRIEBSKOMPONENTEN .....	28
<b>3.1 Verbrennungsmotor .....</b>	<b>29</b>
3.1.1 Effizienzsteigernde Maßnahmen bei Verbrennungsmotoren .....	29
3.1.2 Verbrennungsmotor in parallelen Hybridfahrzeugen .....	37
3.1.3 Verbrennungsmotor in seriellen Hybridfahrzeugen .....	38
3.1.4 Verbrennungsmotoren als Range-extender in elektrischen Fahrzeugen .....	39
3.1.5 Alternative Verbrennungsmotorkonzepte .....	41
3.1.6 Entwicklungspotential für Verbrennungsmotoren .....	42
<b>3.2 Getriebe .....</b>	<b>43</b>
<b>3.3 Elektromotor .....</b>	<b>45</b>
3.3.1 Arten von Elektromotoren .....	45
3.3.2 Elektromotoren für den Antrieb von Straßenfahrzeugen .....	47
3.3.3 Fertigungsverfahren für Elektromotoren .....	48
3.3.4 Elektromotoren für Hilfsantriebe .....	49
3.3.5 Entwicklungspotential bei Elektromotoren .....	50
<b>3.4 Leistungselektronik &amp; Umrichter .....</b>	<b>51</b>
3.4.1 Leistungselektronik für Fahrzeuge .....	51
3.4.2 Entwicklungspotential bei Leistungselektronik .....	53



<b>3.5</b>	<b>Batterie</b> .....	<b>55</b>
3.5.1	Akkumulator-Technologien für den Einsatz als Traktionsbatterien .....	55
3.5.2	Lithium-Ionen-Akkumulator .....	59
3.5.3	Hochenergiezellen und Hochleistungszellen .....	60
3.5.4	Batteriesystem: Aufbau und Komponenten .....	62
3.5.5	Fertigungsschritte der Zellen-, Modul- und Pack-Herstellung .....	63
3.5.6	Wertschöpfung in Deutschland .....	65
3.5.7	Batterie-Kosten .....	67
3.5.8	Sicherheit .....	67
3.5.9	Entwicklungspotential bei Batterien.....	68
<b>3.6</b>	<b>Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Speicher</b> .....	<b>69</b>
3.6.1	State-of-the-Art .....	70
3.6.2	Konzeption und Bauteilanalyse.....	75
3.6.3	Entwicklungspotentiale eines PEFC Brennstoffzellensystems.....	81
3.6.4	Kosten .....	83
3.6.5	Zusammenfassung .....	84
<b>4</b>	<b>ANALYSE ZUKÜNFTIGER FAHRZEUGSTRUKTUREN</b> .....	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Impulsgeber für Veränderungen der Fahrzeugstruktur alternativ angetriebener Fahrzeuge</b> .....	<b>86</b>
4.1.1	Reduzierung des Fahrzeuggewichts.....	86
4.1.2	Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit neuer Strukturbauteile.....	88
4.1.3	Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge .....	88
4.1.4	Ressourcenverfügbarkeit .....	90
4.1.5	Fahrzeugklimatisierung .....	90
4.1.6	NVH-Anforderungen .....	91
4.1.7	Kundenwunsch und Kundenakzeptanz .....	93
<b>4.2</b>	<b>Technologie- und Gestaltungsoptionen für die Verbesserung von Strukturen zukünftiger alternativ angetriebener Fahrzeuge</b> .....	<b>93</b>
4.2.1	Werkstoffe .....	93
4.2.2	Bauweisen.....	101
4.2.3	Fertigungstechnologien.....	107
4.2.4	Kompetenzen und Qualifikation.....	109
<b>5</b>	<b>ANALYSE ZUKÜNFTIGER HEIZ- UND KÜHLSTRATEGIEN</b> .....	<b>111</b>
<b>5.1</b>	<b>Maßnahmen zur Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs</b> .....	<b>111</b>
<b>5.2</b>	<b>Heiz- und Kühl-Konzepte für einzelne Fahrzeug- und Antriebskonzepte</b> .....	<b>115</b>
5.2.1	Verbrennungsmotor und Micro- bzw. Mild-Hybrid .....	115
5.2.2	Vollhybrid.....	116
5.2.3	Batteriefahrzeug .....	116
5.2.4	Brennstoffzellenfahrzeug .....	117
<b>5.3</b>	<b>Heiz- und Kühl-Konzepte allgemein (für alle Fahrzeug- und Antriebskonzepte)</b> .....	<b>117</b>
5.3.1	Heizkonzepte: Energiewandler und -speicher .....	117
5.3.2	Kühlkonzepte: Energiewandler und -speicher.....	121
<b>5.4</b>	<b>Entwicklungspotentiale bei Heiz- und Kühlstrategien</b> .....	<b>121</b>

6	WETTBEWERB DER ELEKTRIFIZIERUNGS-STRATEGIEN.....	123
6.1	<b>Das Fahrzeugtechnik-Szenariomodell VECTOR21 .....</b>	<b>124</b>
6.2	<b>Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung.....</b>	<b>125</b>
6.3	<b>Mögliche Entwicklungen der Neufahrzeugflotte.....</b>	<b>125</b>
6.3.1	Basisszenario .....	126
6.3.2	BEV-Szenario.....	129
6.3.3	Acceleration-Szenario.....	130
6.3.4	Kommentierung der Szenarien .....	132
7	RELEVANZ UND FORSCHUNGSBEDARF .....	133
7.1	<b>Bewertungsmethode .....</b>	<b>133</b>
7.2	<b>Mitarbeiterqualifikation und -kompetenzen.....</b>	<b>134</b>
7.3	<b>Übergreifender Forschungsbedarf .....</b>	<b>135</b>
7.3.1	Fertigungstechnologien.....	135
7.3.2	Werkstoffe .....	136
7.4	<b>Relevanz und Forschungsbedarf.....</b>	<b>137</b>
7.4.1	Fertigungstechnologien.....	137
7.4.2	Werkstoffe .....	150
8	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT .....	159
	LITERATURVERZEICHNIS.....	161
	ANHANG .....	169

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Struktur und Vorgehen der AELFA-Studie. ....	14
Abbildung 3.1: Gängige Art der Einteilung von Elektromotoren. ....	47
Abbildung 3.2: Fertigungsverfahren für eine fremderregte Synchronmaschine, Wickeln der Statorspulen (links und mitte), Wickeln des Rotors (rechts). ....	49
Abbildung 3.3: Transversalflussmaschine .....	50
Abbildung 3.4: Klassifizierung von Umrichterarten. ....	52
Abbildung 3.5: Umrichter mit integriertem DC/DC-Wandler. ....	53
Abbildung 3.6: Derzeitiger Status von Akkumulator-Technologien. ....	57
Abbildung 3.7: Eigenschaften der verschiedenen Zellchemien. Kriterien: Spezifische Energie, Spezifische Leistung, Sicherheit, Performance (Spitzenleistung bei niedrigen Temperaturen, Ladezustandsmessungen, Thermomanagement), Lebensdauer, Kosten. ....	61
Abbildung 3.8: Gewichtsanteile von Aktiv- und Passivmaterialien bei Hochenergie- (HE) und Hochleistungszellen (HP). ....	62
Abbildung 3.9: Zelltypen (richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ ). ....	62
Abbildung 3.10: Batterie: Aufbau und Komponenten. ....	63
Abbildung 3.11: Fertigungsschritte Zellherstellung. ....	64
Abbildung 3.12: Fertigungsschritte Modulherstellung. ....	65
Abbildung 3.13: Fertigungsschritte Packherstellung. ....	66
Abbildung 3.14: Prozessschritte und deutsche Anbieter. ....	67
Abbildung 3.15: Vergleich der Wirkungsgradbereiche von Kreisprozessen und offenen elektrochemischen Prozessen. ....	71
Abbildung 3.16: Exemplarische Beispiele der Vertreter von PEFC-Fahrzeugen für unterschiedliche Fahrzeugklassen. ....	72
Abbildung 3.17: Entwicklungsphasen in der Evolution von Brennstoffzellenfahrzeugen. ....	73
Abbildung 3.18: Funktionsprinzip der Brennstoffzelle. ....	74
Abbildung 3.19: Aufbau eines Brennstoffzellenstapels. ....	75

Abbildung 3.20: Verfahren und Technologie zur Wasserstoffspeicherung über der Temperatur aufgetragen mit Speicherdichte und Energieaufwand. ....	76
Abbildung 3.21: Aufbau eines typischen Hochdruckgastanks. ....	77
Abbildung 3.22: Packaging des Xcellsys HY-80 Brennstoffzellensystems für die Fahrzeugintegration. ....	78
Abbildung 3.23: Integration der Brennstoffzellekomponenten am Beispiel des f-Cell A-Klasse von Daimler mit den Komponenten Elektromotor (1), Brennstoffzellensystem (2), Hochdruckspeicher (3) und Hochspannungsbatterie (4). ....	79
Abbildung 3.24: Systemdefinition eines repräsentativen PEFC-Systems mit Systemmodulen und deren Subsystemen. ....	80
Abbildung 3.25: Prozentuale Kostenverteilung der BZ-Stapelkomponenten bei einer Großserienfertigung. ....	84
Abbildung 4.1: Leichtbaupotentiale und mögliche Seriengrößen unterschiedlicher Fahrzeugstrukturbauweisen. ....	85
Abbildung 4.2: Vorderwagenstrukturen mit einer Frontantriebsanordnung im VW Golf 5 (links) und Mittelmotoranordnung im Audi R8. (rechts).....	86
Abbildung 4.3: Reichweitenerhöhung durch Massereduktion bei einem kleinen Fahrzeug (Masse 1000kg) bei unterschiedlichen Fahrzyklen. ....	87
Abbildung 4.4: Veränderung der Massenverteilung in Elektrofahrzeug gegenüber einem konventionell betriebenen Fahrzeug.....	89
Abbildung 4.5: Beispiel für die Veränderung der Reichweite eines Elektrofahrzeugs durch die Fahrzeugklimatisierung im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bei Vergleich zwischen dem kompletten Zyklus (blau) und dem innerstädtischen Anteil des Zyklus (orange). ....	91
Abbildung 4.6: Herausforderungen im Hinblick auf NVH – Beispiele wegfallender (blau durchgestrichen) und zusätzlicher (orange Balken) Frequenzspektren.....	92
Abbildung 4.7: Übersicht über die betrachteten Schwerpunktthemen.....	93
Abbildung 4.8: Teile des FlexBody Modulbaukastens (flexbody.net) (links) und DLR-Spant-Space-Frame-Bauweise (rechts) mit Faserverbundringspanten im A-, B- und C-Säulenbereich.....	95
Abbildung 4.9: Eigenschaften moderner Stähle und anderer Werkstoffe.....	96
Abbildung 4.10: Glühende Blechplatine in einem Presshärtewerkzeug.....	97
Abbildung 4.11: Frontend-Träger des Audi A2 in Hybridbauweise. ....	98
Abbildung 4.12: Übersicht über die Verwendung von Primärmagnesium. ....	101
Abbildung 4.13: Super-Light Car-Karosserie in Multi-Material Design, unten CAD Model, rechts oben Demonstrator.....	102

Abbildung 4.14: Modulteilung zwischen Aluminium (blau) und Stahlstruktur (grau). .....	103
Abbildung 4.15: Konzeptidee (links) und erfolgreich im Crash erprobte (rechts) adaptierbare Vorderwagenstruktur. ....	106
Abbildung 4.16: Bewertungskriterien für Fertigungsprozesse mit Darstellung eines neutralen Beispiels (blau). ....	108
Abbildung 5.1: Maßnahmen zur Reduktion des stationären Heiz- und Kühlbedarfs. ....	112
Abbildung 5.2: Beispiele für Heizkonzepte: Wasserheizung (Eberspächer Hydronic, links) und Luftheizung (Eberspächer Airtronic, rechts). ....	118
Abbildung 6.1: Exemplarische Auflistung der für die kommenden Jahre angekündigten elektrifizierten Fahrzeugkonzepte. ....	123
Abbildung 6.2: Szenarioannahmen im AELFA-Basisszenario. ....	127
Abbildung 6.3: Marktsegmentierung nach Antriebsarten und Fahrzeugsegment des deutschen Neufahrzeugmarktes im AELFA-Basisszenario. ( <i>Fahrzeuge: G: Benzin, D: Diesel, CNG: Erdgas, Hyb: Hybride Varianten, PHEV: Plug-in-Hybride, EREV: Range-extender, BEV: Batterie, FCV: Brennstoffzelle</i> ). ....	128
Abbildung 6.4: Veränderung des gesamten Flottenbestands (links) sowie die damit verbundene Reduzierung von CO <sub>2</sub> -Emissionen im AELFA-Basisszenario. ....	129
Abbildung 6.5: Entwicklung des gesamten Neufahrzeugmarktes (links) sowie des Flottenbestands im ersten AELFA-Alternativszenario. ....	130
Abbildung 6.6: Marktsegmentierung nach Antriebsarten und Fahrzeugsegment des deutschen Neufahrzeugmarktes im zweiten AELFA-Alternativszenario. ( <i>Fahrzeuge: G: Benzin, D: Diesel, CNG: Erdgas, Hyb: Hybride Varianten, PHEV: Plug-in-Hybride, EREV: Range-extender, BEV: Batterie, FCV: Brennstoffzelle</i> ). ....	131
Abbildung 6.7: Veränderung des gesamten Flottenbestands (links) sowie die damit verbundene Reduzierung von CO <sub>2</sub> -Emissionen im zweiten AELFA-Alternativszenario. ....	132
Abbildung 7.1: Bewertungsmatrix der Hauptantriebsstrangkomponenten hinsichtlich der Fertigungstechnologien. <i>Prozentwerte geben den Anteil der Fertigungstechnologie an der Wertschöpfung der Antriebsstrangkomponente an.</i> ....	138
Abbildung 7.2: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung des Antriebsstrangs im Basisszenario in den Stützjahren 2010 und 2040. ....	139
Abbildung 7.3: Anteil der 10 relevantesten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung im Basisszenario. ....	140
Abbildung 7.4: Fertigungstechnologien mit abnehmenden Anteilen an der Wertschöpfung (2010: 100%). ....	141
Abbildung 7.5: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario in den Stützjahren 2010 und 2040 (sortiert nach Relevanz in 2010). ....	142



Abbildung 7.6: Anteil der 10 wichtigsten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung im ersten Alternativszenario. ....	144
Abbildung 7.7: Prozentuale Veränderung der Relevanz der Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario im Vergleich zum Basisszenario in 2040. ....	145
Abbildung 7.8: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien im zweiten Alternativszenario in den Stützjahren 2010 und 2040 (sortiert nach Relevanz in 2010). ....	146
Abbildung 7.9: Prozentuale Veränderung der Relevanz der Fertigungstechnologien im zweiten Alternativszenario im Vergleich zum Basisszenario in 2040. ....	147
Abbildung 7.10: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Fertigungstechnologien des zweiten Alternativszenarios im Vergleich zum ersten Alternativszenario in 2040. ....	148
Abbildung 7.11: Überblick über die Entwicklung der Relevanz der Fertigungstechnologien in allen drei Fahrzeugszenarien. ....	149
Abbildung 7.12: Bewertungsmatrix der Hauptantriebsstrangkomponenten hinsichtlich der Werkstoffe. <i>Prozentwerte geben den Anteil des Werkstoffs an der Masse der Antriebsstrangkomponente an.</i> ....	150
Abbildung 7.13: Relevanz der Werkstoffe im Antriebsstrang in den Stützjahren 2010 und 2040 im Basisszenario. ....	151
Abbildung 7.14: Zeitliche Entwicklung der Relevanz der 10 wichtigsten Werkstoffe im Basisszenario. ....	152
Abbildung 7.15: Werkstoffe mit abnehmender Relevanz im Basisszenario. ....	153
Abbildung 7.16: Relevanz der Werkstoffe in den Stützjahren 2010 und 2040 im ersten Alternativszenario. ....	155
Abbildung 7.17: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Werkstoffen des ersten Alternativszenarios im Vergleich zum Basisszenario in 2040. ....	156
Abbildung 7.18: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Werkstoffen des zweiten Alternativszenarios im Vergleich zum Basisszenario in 2040. ....	157
Abbildung 7.19: Überblick über die Entwicklung der Relevanz der Werkstoffe in allen drei Fahrzeugszenarien. ....	158

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Charakterisierung von Hybridkonzepten: Technik und Vor-/Nachteile.....	16
Tabelle 2.2: Entwicklung der Neuzulassungen von Hybridfahrzeugen von 2008 bis 2011 für USA, Japan und Deutschland, prozentualer Anteil an den Jahresneuzulassungen und Anteil im Bestand heute.....	17
Tabelle 2.3: Charakterisierung von Konzepten zum Anschluss ans Stromnetz: Technik und Vor- und Nachteile.....	18
Tabelle 2.4: Entwicklung der Neuzulassungen elektrifizierter Fahrzeuge mit Netzanschluss.....	19
Tabelle 2.5: Charakterisierung des Wasserstoff-Brennstoffzellen Fahrzeugkonzepts: Technik und Vor- und Nachteile.....	20
Tabelle 2.6: Entwicklungen von Mobilität: Mensch und Kunde – Verhalten und Nutzen.....	25
Tabelle 2.7: Ergebnis des Expertenworkshops 1.1 zur Frage nach Treibern für Veränderungen im Bereich des motorisierten Individualverkehrs mit dem Zeithorizont 2025.....	26
Tabelle 3.1: Realisierbare Betriebszustände von Hybridantrieben.....	28
Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Maschinenarten Gleichstrommaschine (GM), Asynchronmaschine (ASM), fremderregte Synchronmaschine (FSM), dauermagneterregte Synchronmaschine (DRM), geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) und Transversalflussmaschine (TFM).....	48
Tabelle 3.3: HEV hybrid electric vehicle, PHEV parallel hybrid electric vehicle, EV (battery) electric vehicle.....	55
Tabelle 3.4: Energiedichten der wichtigsten Energieträger.....	56
Tabelle 5.1: Kühlbedarf eines Pkw. Testbedingungen: Außentemperatur 40 °C, relative Luftfeuchtigkeit 60%, Sonneneinstrahlung 1000 W/m <sup>2</sup> , 4 Passagiere, 20% Außenluft.....	113
Tabelle 5.2: Heizbedarf eines Pkw. Testbedingungen: Außentemperatur -20 °C, relative Luftfeuchtigkeit 80%, Sonneneinstrahlung 0 W/m <sup>2</sup> , 1 Passagier, 100% Außenluft.....	114

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current, dt.: Wechselstrom
AFC	Alkaline fuel cell, dt.: alkalische Brennstoffzelle
AT	Automatic transmission, dt.: Automatikgetriebe
ATL	Abgasturbolader
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Battery electric vehicle, dt.: Batteriefahrzeug
CFK	Carbon-faserverstärkter Kunststoff
CVT	Continuously variable transmission, dt.: stufenloses Getriebe
DC	Direct current, dt.: Gleichstrom
DCT	Dual clutch transmission, dt.: Doppelkupplungsgetriebe
DMFC	Direct methanol fuel cell, dt.: Direktmethanolbrennstoffzelle
DRM	Dauermagneterregte Synchronmaschine
EREV	Extended-range electric vehicle, dt.: Range-extender Fahrzeug
FCV	Fuel cell electric vehicle, dt.: Brennstoffzellenfahrzeug
FCK	Faserverbundkunststoffe
FSM	Fremderregte Synchronmaschine
GM	Gleichstrommaschine
ICE	Internal combustion engine, dt.: Verbrennungsmotor
ICV	Internal combustion engine vehicle, dt.: verbrennungsmotorisch betriebenes Fahrzeug
KBA	Kraftfahrtbundesamt
MCFC	Molten carbonate fuel cell, dt.: Schmelzkarbonatbrennstoffzelle
MMD	Multi-material-design
MQB	Modularer Querbaukasten
MT	Manual transmission, dt.: manuelles Getriebe
NVH	Noise, Vibration, Harshness, dt.: Geräusch, Vibration, Rauheit
PAFC	Phosphoric acid fuel cell, dt.: Phosphorsäurebrennstoffzelle
PEFC	Polymer electrolyte fuel cell, dt.: Polymerelektrolytbrennstoffzelle
PEM	Polymer electrolyte membrane, dt.: Polymerelektrolytmembran
PHEV	Plug-in Hybrid
PTC	Positive temperature coefficient, dt.: positive Temperaturkoeffizient
SOFC	Solid oxide fuel cell, dt.: Festoxidbrennstoffzelle
SRM	Switched reluctance motor, dt.: geschaltete Reluktanzmaschine
TFM	Transversalflussmaschine

# 1 Motivation für die Studie und Vorgehen

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen bedingt einen Wandel in der Automobilindustrie bzw. ihren Fahrzeugtechnologien. Ziel der vorliegenden Studie ist die Identifikation dieser Veränderungen sowie die Analyse der damit verbundenen Forschungsbedarfe in den Bereichen der Mitarbeiterqualifikation bzw. -kompetenzen, der Fertigungstechnologien sowie der benötigten Werkstoffe und Bauweisen.

Eine sukzessive Elektrifizierung des Antriebsstrangs stellt die gesamte Fahrzeugindustrie vor große Herausforderungen. Neue Komponenten und Fahrzeugarchitekturen implizieren neue Handlungsfelder, welche bisher nur vereinzelt adressiert werden. Der hiermit verbundene Wandel ist mit großen Unsicherheiten für alle Akteure verbunden und betrifft Unternehmen aller Größenklassen und Wertschöpfungsbereiche. Darüber hinaus stellt diese Veränderung die Forschungslandschaft vor signifikante Herausforderungen. Fragen hinsichtlich der Identifikation relevanter Forschungsthemen, der Priorisierung dieser Themen sowie der damit verbundenen zeitlichen Abfolge bedürfen der systematischen Analyse. Die Unterscheidung in notwendige Themenbereiche und solche, welche optional oder als Erweiterung der zwingend erforderlichen Kompetenzen angesehen werden ist vielschichtig.

Mithin sind die Identifikation der relevanten Forschungsbedarfe und die Diskussion der Themenstellungen mit Experten aus Industrie und Forschung essentiell. Die vorliegende Studie führt deshalb zunächst eine systematische Analyse der Struktur elektrifizierter Fahrzeugkonzepte durch. Entlang der drei Dimensionen „Kompetenzen“, „Fertigungstechnologien“ und „Werkstoffe“ werden zukünftige Fahrzeugkonzepte detailliert analysiert. Hierbei werden die Bereiche des eigentlichen Antriebsstrangs sowie der übergreifenden Fahrzeugstruktur berücksichtigt. Da das Thermomanagement des Fahrzeugs beide Teilbereiche als Querschnittsthema adressiert, wird diese Fragestellung gesondert betrachtet.

Die anschließende Kopplung dieser Analysen mit möglichen zukünftigen Entwicklungen des deutschen Fahrzeugmarktes ermöglicht eine Gewichtung der Ergebnisse und letztlich eine Priorisierung der Forschungsthemen. Hierzu werden drei Fahrzeugszenarien mit Hilfe des Simulationstools *VECTOR21* quantifiziert. Um die Auswirkungen, aber auch die dazu notwendigen Randbedingungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs aufzeigen zu können, wird hierbei der Fokus auf im Sinne der Elektromobilität positive zukünftige Entwicklungen gelegt. Als Ergebnis der Studie liegt durch das Zusammenbringen der unterschiedlichen Analysen somit neben der detaillierten Strukturanalyse elektrifizierter Fahrzeugkonzepte und der dazugehörigen Komponenten eine Quantifizierung des notwendigen Forschungsbedarfs vor.

Um die Einbindung der dezentralen Intelligenzen des Landes Baden-Württemberg aus Automobil- und Zulieferindustrie sowie der Forschung sicherzustellen, wurden im Rahmen der Studie Expertenworkshops durchgeführt. Hierbei wurden in insgesamt sieben Workshops mit 45 Industrieexperten die Themenstellungen „Fahrzeugkonzepte und Markt“, „Komponenten elektrifizierter Antriebe“, „Fahrzeugaufbauweisen und Elektrifizierung“ sowie „Klimatisierung bei elektrifizierten Antrieben“ bearbeitet. Forschungspartner waren dabei u. a. das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (SZW) sowie die Universität Stuttgart. Die Ergebnisse dieser Workshops sind in die Analysen der Studie direkt eingeflossen.

Mit der vorliegenden Studie soll die Transparenz in dem komplexen Themengebiet der Elektrifizierung von Antriebssträngen erhöht und somit eine Entscheidungsgrundlage in Politik, Industrie und Forschung geliefert werden.

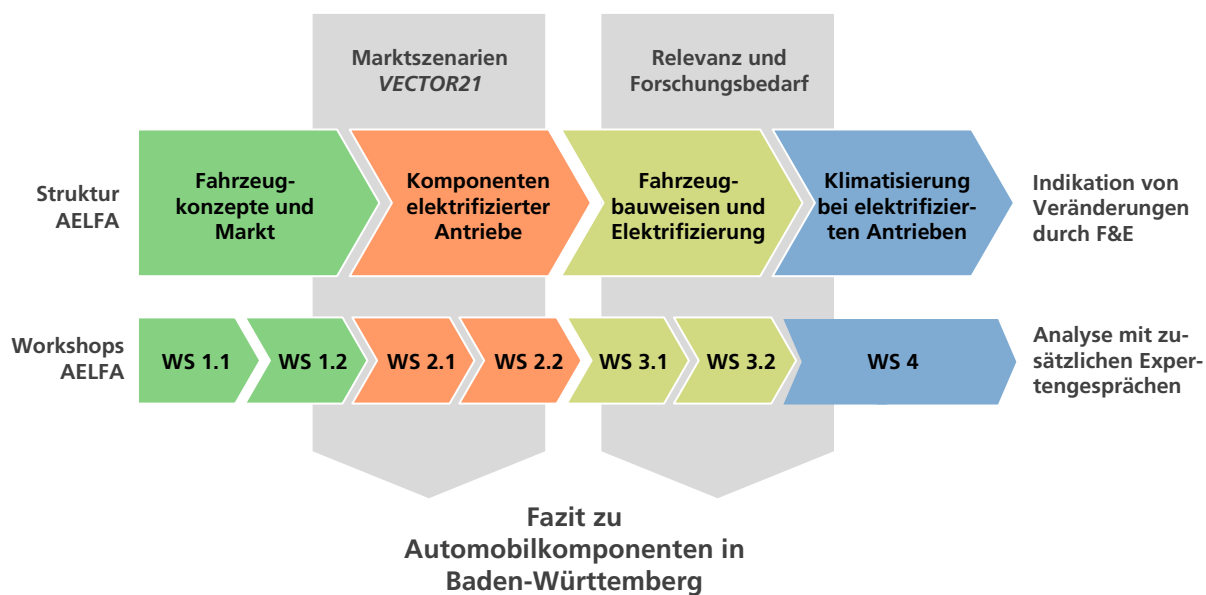


Abbildung 1.1: Struktur und Vorgehen der AELFA-Studie.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eine Übersicht zu den AELFA-Workshops befindet sich im Anhang.



## 2 Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte

Die klima- und energiepolitischen Ziele für den Sektor Verkehr können ohne den verstärkten Einsatz elektrischer Fahrzeugantriebe im Straßenverkehr nicht erreicht werden (BMU 2011). Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, entweder in der Verbindung mit einem Verbrennungsmotor (Hybrid, Range-extender etc.), als reines Batteriefahrzeug (BEV) oder als Brennstoffzellenfahrzeug (FCV) bietet die vielversprechendste Lösung zur langfristigen signifikanten CO<sub>2</sub>-Reduktion und zur Diversifizierung von fossilen Energieträgern. Zusätzliche Vorteile elektrischer Antriebe sind lokal emissionsfreies Fahren, Lärminderung außen und niedrige Innenraumgeräusche im unteren Geschwindigkeitsbereich.

Der Einstieg in die Elektromobilität ist mit der Überwindung großer Hürden verbunden. Im Wesentlichen unterbinden die heute hohen Kosten einen schnellen und breiten Markteintritt. Aber auch technologische Barrieren unterbinden heute noch die Nutzung elektrifizierter Fahrzeuge, so wie es Kunden heute vom konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gewohnt sind, z. B. eine hohe Reichweite und die hohe Verfügbarkeit.

Die Etablierung der Elektromobilität wird durch wesentliche Einflussfaktoren wie die hohen Kosten behindert, so dass ein schneller und breiter Markteintritt noch nicht erfolgen konnte. Darüber hinaus stellen technologische Barrieren, die eingeschränkte Reichweite eines elektrifizierten Fahrzeuges und dessen Verfügbarkeit im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen unterbindende Suggestionen dar. In Kapitel 2 wird der Ausgangspunkt am Markt heute im Überblick zusammengefasst. Dabei werden Konzepte mit Verbrennungsmotor (Hybrid, Range-Extender etc.) und reine Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge unterschieden. Dies dient als Einstieg in die detaillierte Untersuchung der Antriebskomponenten, der Fahrzeugbauweisen und zukünftiger Heiz- und Kühlstrategien.

### 2.1 Heutige elektrifizierte Antriebskonzepte

#### 2.1.1 Hybridfahrzeuge

Ein Hybridantrieb besteht aus einer Kombination unterschiedlicher Antriebssysteme. Es liegen dabei mindestens zwei Energiewandler (z. B. Motoren) und dazugehörige Energiespeicher (z. B. Tank oder Batterie) vor. Man unterscheidet zwischen seriellem, parallelem, split und kombiniertem Hybrid. Ein hybrid-elektrischer Antrieb kann in Verbindung mit verbrauchsreduzierenden oder wirkungsgradsteigernden Maßnahmen eingesetzt werden. Die Lastpunktanhebung, bei der elektrische Energie in Bereichen des Teillastbetriebes des Verbrennungsmotors erzeugt wird und der Wirkungsgrad dieses angehoben wird oder das sogenannte Downsizing, bei dem beispielsweise der Hubraum des Motors verkleinert und dessen Leistung durch Turboaufladung beibehalten werden kann, haben diese Intension. Rekuperative Systeme zur Bremsenergierückgewinnung und die damit verbundene Reichweitensteigerung verfolgen dasselbe Ziel. Nachteilig sind erhöhte Kosten, eine gesteigerte Systemkomplexität und eine vergrößerte Fahrzeugmasse.


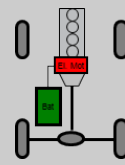

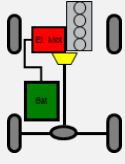

Unterschieden werden verschiedene Stufen der „Hybridisierung“, die sich an der Leistung des Elektromotors orientieren. In der Literatur steht eine Reihe von Studien zur Verfügung, welche sich mit der Modellierung von Hybridfahrzeugen beschäftigen. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass auf dem Automobilmarkt bereits verschiedene Hybridfahrzeuge kommerziell erhältlich sind, wie z. B. der Honda Insight (nur USA), der Honda Civic und der Toyota Prius.

## Technische Charakterisierung

Man unterscheidet zwischen systemisch seriell, parallel, split- und kombiniertem Hybrid. Verschiedene Stufen der Hybridisierung, die sich an der Leistung des Elektromotors orientieren, werden außerdem unterschieden. Die Spanne reicht vom Micro-Hybrid mit geringer elektrischer Leistung, z. B. Smart MHD, bis hin zum Voll-Hybrid, der elektrisch lokal emissionsfreies Fahren ermöglicht.

Die wesentlichen Konzepte sind in mit einer kurzen Charakterisierung der Technik und ihren Vor- und Nachteilen dargestellt.

**Tabelle 2.1: Charakterisierung von Hybridkonzepten: Technik und Vor-/Nachteile.**

Systembild	Technik	Vor-/Nachteile	Beispiel
<b>Micro-Hybrid</b> 	Start-Stopp, regeneratives Bremsen mit Startergenerator Spannung: 12 V Elektrische Leistung ~2 kW Batteriekapazität: 0,6-1,2 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kostengünstig, Bremsenergie-rückgewinnung bringt Vorteile in der Stadt</li> <li>- geringes Einsparpotential, kein Einfluss auf Langstrecken</li> </ul>	 <i>Smart MHD</i>
<b>Mild-Hybrid</b> 	Start-Stopp, Rekuperation, Beschleunigungsunterstützung Spannung: 36-150 V Elektrische Leistung 5-20 kW Batteriekapazität: 1 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ gutes Aufwand/ Nutzenverhältnis, spürbare Verbrauchsenkung</li> <li>- Mehrgewicht, Packagingprobleme, Batteriekosten</li> </ul>	 <i>Mercedes S 400 Hybrid</i>
<b>Voll-Hybrid</b> 	Start-Stopp, Rekuperation, kurzes elektrisches Fahren Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-50 kW Batteriekapazität: 0,6-2 kWh	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr gute Fahrleistungen, hohes Einsparpotential bei Stadtfahrten, lokal abgasfreies Fahren möglich</li> <li>- hoher technischer und finanzieller Aufwand, hohes Zusatzgewicht</li> </ul>	 <i>Toyota Prius</i>

Quelle: nach Wallentowitz et al. (2009).

## Marktentwicklung

Der Markt für Hybridfahrzeuge ist jung und muss sich langsam entwickeln. Die meisten Fahrzeughersteller bieten mittlerweile Hybridvarianten ihrer Fahrzeuge an und/oder haben zusätzliche Modelle mit Hybridtechnik angekündigt. Das erfolgreichste Modell ist der Toyota Prius mit über 2 Millionen verkauften Exemplaren weltweit. In Japan waren im Jahr 2010 7,5% aller verkauften Pkw Toyota Prius, insgesamt 315.669 Exemplare (IEA-HEV 2011). Abgesehen vom japanischen Pkw-Markt, in dem Hybridfahrzeuge seit 2009 einen Anteil von über 10% haben, ist der Anteil in anderen Märkten vergleichsweise sehr gering. In den USA liegt der Hybridfahrzeuganteil bei etwa 2%, in Deutschland deutlich unter 1%. Eckdaten für die wichtigen Märkte USA, Japan und Deutschland sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

**Tabelle 2.2: Entwicklung der Neuzulassungen von Hybridfahrzeugen von 2008 bis 2011 für USA, Japan und Deutschland, prozentualer Anteil an den Jahresneuzulassungen und Anteil im Bestand heute.**

	2008	2009	2010	2011	Bestand
<b>USA</b>					
[Stück]	315.763	290.273	274.993	209.290	1.888.978
[%]	2,39	2,79	2,37	1,99	0,74
<b>Japan</b>					
[Stück]	117.826	464.901	444.535	- <sup>§</sup>	1.429.535
[%]	2,79	11,8	10,55	- <sup>§</sup>	2,45
<b>Deutschland</b>					
[Stück]	6.464	8.374	10.661	9.214	37.256
[%]	0,21	0,22	0,37	0,38	0,09

Quellen: JAMA (2011), Howell (2011)

Anm.: <sup>§</sup> Zahlen für 2011 noch nicht verfügbar

Hybridfahrzeuge beinhalten eine hohe Anzahl heute noch kostenintensiver technischer Komponenten. Hybridisierte Automobile können auf Grund der mittel- bis langfristig geforderten CO<sub>2</sub>-Reduktion trotzdem eine Brückentechnologie darstellen. Eine Weiterentwicklung zum Plug-In Hybridfahrzeug als Fahrzeug für größere Entfernungen würde das volle CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential im Zusammenspiel mit einer erneuerbaren Stromversorgung besser nutzen.

Auf dem Weg zum Hybrid-Massenmarkt müssen schrittweise spezialisierte Komponenten für elektrische Maschinen, Leistungselektronik und nicht zuletzt Traktionsbatterien entwickelt werden, um die prognostizierten Kostenreduktionspotentiale zu realisieren und die entsprechenden Produktionstechnologien und -kapazitäten aufzubauen. Die Untersuchungen in den Kapiteln 3, 4 und 5 dienen dazu die technologischen Entwicklungsrichtungen aufzuzeigen.

### 2.1.2 Elektrifizierte Fahrzeuge zum Anschluss an das Stromnetz

In rein batterieelektrischen Fahrzeugen wird die mechanische Energie zum Antrieb durch einen Elektromotor gewandelt. Die Energie wird in der Traktionsbatterie, einem chemischen Speicher, im Fahrzeug mitgeführt und am Stromnetz wieder aufgeladen. Daneben werden heute Konzepte vorgeschlagen, welche eine Mischung aus Hybridfahrzeug und Batteriefahrzeug darstellen und je nach Auslegung als Range-extender-Fahrzeuge (EREV) oder Plug-In Hybrid (PHEV) bezeichnet werden. Diese Fahrzeuge überwinden die Reichweitenbeschränkung durch die Batterie dadurch, dass auf eine konventionelle Energiewandlung durch Kraftstoffverbrennung zurückgegriffen wird. Zum einen wird im Fahrzeug Strom erzeugt und mit diesem

ein elektrischer Antriebsmotor betrieben (REX) und zum anderen kann konventionell gefahren werden (PHEV).

**Tabelle 2.3: Charakterisierung von Konzepten zum Anschluss ans Stromnetz: Technik und Vor- und Nachteile.**

Systembild	Technik	Vor-/Nachteile	Beispiel
<p><b>Batterie</b></p> 	<p>Rekuperation, rein elektrisches Fahren</p> <p>Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-70 kW Batteriekapazität: 10-30 kWh</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohes CO<sub>2</sub> Einsparpotential, insbes. mit erneuerbarem Strom</li> <li>- aufgrund der Batteriekosten heute relativ teuer im Vgl. zu konventionellem Fahrzeug; beschränkte Reichweite</li> </ul>	 <p><i>Nissan Leaf</i></p>
<p><b>Range-Extender</b></p> 	<p>Rekuperation, rein elektrisches Fahren, autonome Stromversorgung aus Kraftstoff</p> <p>Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-70 kW Motorische Leistung Batteriekapazität: 10-30 kWh</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohes CO<sub>2</sub> Einsparpotential, insbes. mit erneuerbarem Strom; keine Reichweitenbeschränkung; Kostenreduktion durch Einsparung bei Batteriekosten</li> <li>- Mehrgewicht, Packagingprobleme, Kosten durch Range-extender-System</li> </ul>	 <p><i>Opel Ampera</i></p>
<p><b>Plug-In Hybrid</b></p> 	<p>Start-Stopp, Rekuperation, längeres elektrisches Fahren</p> <p>Spannung: 200-400 V Elektrische Leistung 30-50 kW Batteriekapazität: 5-15 kWh</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ sehr gute Fahrleistungen, hohe CO<sub>2</sub>-Reduktion bei Stadtfahrten, lokal abgasfreies Fahren möglich</li> <li>- hoher technischer und finanzieller Aufwand, hohes Zusatzgewicht</li> </ul>	 <p><i>Toyota Prius Plug-In</i></p>

Bildquellen: <http://www.hybrid-elektrofahrzeuge.de>; [www.nissan-zeroemission.com](http://www.nissan-zeroemission.com)

### Marktentwicklung

Auf Großserie angelegte Batterie- und Plug-In Hybrid-Fahrzeuge sind seit wenigen Jahren auf dem Markt. Der Mitsubishi i-MiEV startete im Mini-Segment im Jahr 2009 in Japan und ist seit Dezember 2010 in Deutschland und seit Dezember 2011 in den USA (nur Flotten) erhältlich. Der größere Nissan Leaf und das erste industrielle Range-Extender-Fahrzeug, der Volt von General Motors, sind seit Dezember 2010 auf dem Markt verfügbar. Die Flottenzahlen sind absolut gesehen auf Grund der unlängst stattgefundenen Markteinführung noch weit unter 1% und damit sehr gering. Die Verkaufszahlen zeigen allerdings einen positiven Trend. Aktuelle Eckdaten sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Entwicklung der Neuzulassungen elektrifizierter Fahrzeuge mit Netzanschluss.

	2008	2009	2010	2011	Bestand
<b>USA</b>					
BEV	n. a.	n. a.	16	8009 <sup>\$\$</sup>	n. a.
PHEV	-	-	326	5003 <sup>#</sup>	n. a.
<b>Japan</b>					
BEV	0	1706	7503 <sup>++</sup>	- <sup>§</sup>	11303
					0,02%
<b>Deutschland</b>					
BEV	36	162	541	- <sup>§</sup>	2307
					0,01%

Quellen: Deutschland: KBA (2011); Japan: JAMA (2011); USA: Howell (2011).

Anm.: # bis Okt. 2011, \$\$ bis Okt. 2011, ohne Tesla Roadster, ohne Think City EVs, 99,5% Nissan Leaf; ++ davon ca. 36% Micro-cars; § Zahlen für 2011 noch nicht verfügbar.

Die hohen Kosten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen sind als problematisch anzusehen. Durch öffentliche Förderung und Subventionen können die Preise auf ein Niveau gesenkt werden, welches für so genannte „Innovatoren“, sei es privat oder als Flottenkunden, akzeptabel ist. Dies liegt primär an den hohen spezifischen Batteriekosten. Eine interessante und praktikable bzw. vom Nutzer akzeptierte Reichweite wird durch eine entsprechende Größe der Batterie erreicht. Dies führt zu hohen Gesamtkosten. Abgesehen davon müssen analog zu den Hybridfahrzeugen spezielle Komponenten wie Elektromotoren, Leistungselektronik, Software etc. weiterentwickelt werden, um Kostenreduktionspotentiale zu realisieren und die entsprechenden Produktionstechnologien und –kapazitäten aufzubauen. Möglichkeiten dazu werden in den Kapiteln 3, 4 und 5 aufgezeigt.

### 2.1.3 Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge

Brennstoffzellen werden als Antriebskonzept für Pkw eingesetzt seitdem General Motors im Jahr 1966 als erste Automobilfirma einen Minivan mit Brennstoffzelle vorgestellt hat. Insbesondere während der 1990er Jahre und zu Beginn des 21sten Jahrhunderts wurde verstärkt an Brennstoffzellenfahrzeugen geforscht und Demonstrationsfahrzeuge in der Öffentlichkeit präsentiert.

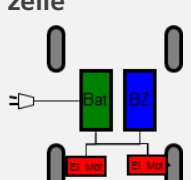
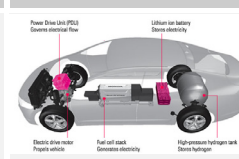
Ein Hauptgrund für den Einsatz der Brennstoffzelle im Pkw ist der relativ hohe Wirkungsgrad dieses Antriebssystems gegenüber einer konventionellen verbrennungsmotorischen Ausführung. In Kombination mit erneuerbar erzeugtem Wasserstoff bieten diese Fahrzeuge eine nahezu emissionsfreie und gleichzeitig fossile Energieressourcen schonende Mobilität.

Die Vorteile von Wasserstoff als Energieträger liegen in seiner Speicherfähigkeit in großem Umfang und langzeitfähig und den gleichzeitig moderaten Kosten. Dies kann in einem Energieversorgungssystem mit einem hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energiequellen, wie z. B. Wind- und Solarstrom von hoher Bedeutung sein. Die Nachteile sind eine relative kostenaufwändige Verteilung im Vergleich zu kohlenwasserstoffhaltigen Energieträgern und Maßnahmen zur Gewährung der Sicherheit. Grundsätzlich könnte Wasserstoff in gasförmiger oder flüssiger Form gespeichert, verteilt und genutzt werden. Eine Verflüssigung würde allerdings einen zusätzlichen Energieaufwand bedeuten, welcher auf Basis erneuerbarer Energie heute teuer wäre.



Ein Vorteil der Brennstoffzelle in Verbindung mit Wasserstoff als Energieträger ist die relativ hohe Reichweite im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen. Mit komprimiertem Druckwasserstoff lässt sich damit eine ähnlich hohe Unabhängigkeit in der individuellen Mobilität erzielen, wie sie heute konventionell gegeben ist, da ein Nachtanken in kurzer Zeit möglich ist. Eine Charakterisierung der Technik und ihrer Vor- und Nachteile ist in Tabelle 2.5 dargestellt.

**Tabelle 2.5: Charakterisierung des Wasserstoff-Brennstoffzellen Fahrzeugkonzepts: Technik und Vor- und Nachteile.**

Systembild	Technik	Vor-/Nachteile	Beispiel
<p><b>Brennstoffzelle</b></p> 	<p>Rekuperation, rein elektrisches Fahren</p> <p>Spannung: 200-400 V</p> <p>Elektrische Leistung 30-100 kW</p> <p>Batteriegröße ist konzeptabhängig</p>	<p>+ lokal emissionsfrei, geräuscharm, hohe Reichweite</p> <p>- Wasserstoffverfügbarkeit, Betankungsinfrastruktur, hohe Kosten des Brennstoffzellensystems heute</p>	 <p><i>Honda FCX Clarity</i></p>

Bildquelle: Herstellerangabe.

Polymer Elektrolyt Membran Brennstoffzellen (PEMFC) werden aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte bevorzugt für Fahrzeuge eingesetzt, bei denen ein geringes Gewicht und der beschränkte Bauraum eine wichtige Rolle spielen. Sie wandeln Wasserstoff und Sauerstoff in einer elektrochemischen Reaktion in Strom um. Ein Brennstoffzellensystem im Fahrzeug erreicht heute einen durchschnittlichen Wirkungsgrad im neuen europäischen Fahrzyklus von etwa 45%, während ein vergleichbares Dieselfahrzeug bei 15 bis 25% liegt. Wasserstoff-Brennstoffzellensysteme für Pkw haben eine hohe technologische Reife erreicht. Die Kosten eines Brennstoffzellensystems liegen bei niedrigen Stückzahlen heute bei etwa 1.300 \$/kW. Bei einer kumulierten produzierten Stückzahl von 1 Mio. Fahrzeuge wird ein Reduktion der Kosten auf 35-83 \$/kW und bei 10 Mio. Fahrzeugen auf 18-40 \$/kW für möglich gehalten (Mock 2010). Diese Werte liegen im Bereich der Zielwerte von 30-45 \$/kW (DoE 2007) und bestätigen eine finanzielle Machbarkeit der Fahrzeuge.

Serienfahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen gibt es heute noch keine. Obwohl heute Hybrid- und Batteriefahrzeuge an oberster Stelle auf der Agenda der Politik und der Öffentlichkeit stehen, ist der Stellenwert einer Wasserstoffwirtschaft mit der Brennstoffzelle als mittel- bis langfristige Lösung für die Mobilität in Industrie, Politik und Forschung ungebrochen. Eine Strukturanalyse des Antriebs und die Chancen ihres Markteintritts sind in Kapitel 3 bzw. Kapitel 6 dargestellt.

## 2.2 Einflussfaktoren auf zukünftige Fahrzeugkonzepte

### 2.2.1 Rahmenbedingungen für den Individualverkehr mit dem Pkw

Die politischen Zielvorgaben und Rahmenbedingungen sind entscheidend für die weitere Entwicklung elektrifizierter Antriebe. Gesetzlich verankerte Ziele zum Klimaschutz im Verkehr, der Einsatz erneuerbarer Energien und der Wunsch zur Steigerung der Luftqualität können den Markteintritt elektrifizierter Fahrzeugkonzepte aufgrund ihrer Umweltvorteile wesentlich vorantreiben. Unterschieden werden können Ziele und Strategiekonzepte auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene, die nachfolgend skizziert werden.

#### **Deutschland**

Deutschlands Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 belaufen sich auf eine Minderung von 40% bis 2020 gegenüber 1990. Darüber hinaus wurde im Energiekonzept vom 6. Juni 2011 von der Bundesregierung der Fahrplan für die Minderung von Treibhausgasemissionen bekräftigt: Diese sollen bis zum Jahr 2020 um 40%, bis 2030 um 55%, bis 2040 um 70% und bis 2050 um 80 bis 95% unter das Niveau von 1990 gesenkt werden (Die Bundesregierung 2011). Die klima- und energiepolitischen Ziele für den Sektor Verkehr können ohne einen verstärkten Einsatz elektrischer Fahrzeugantriebe im Straßenverkehr nicht erreicht werden (BMU 2011). Aus diesem Grund wurde im Energiekonzept für die individuelle Mobilität auf der Straße die Strategie zur Elektromobilität auf Grundlage der gemeinsamen Erklärung von Industrie und Bundesregierung vom 3. Mai 2010 bestätigt. Die Zielgrößen der Bundesregierung sind eine Million Elektrofahrzeuge bis 2020 und sechs Millionen bis 2030 in der deutschen Fahrzeugflotte zu etablieren. Der urbane Straßenverkehr soll bis 2050 überwiegend mit regenerativen Energieträgern realisiert werden (Bundesregierung 2011).

Der Exportmarkt ist neben dem Fahrzeugbinnenmarkt für die deutsche Fahrzeugindustrie von wesentlicher Bedeutung. Die Bundesregierung hat sich aus diesem Grund das Ziel gesetzt, die deutsche Industrie zum Leitanbieter für Elektromobilität zu machen (u.a. BMVBS 2011).

#### **Europäische Union**

Im Dezember 2008 verabschiedeten das Europäische Parlament und der Europäische Rat das „Klima und Energie Paket“. Im so genannten 20-20-20 Ziel wurde festgeschrieben (1) die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 20% gegenüber 1990 und (2) den Energieverbrauch durch eine verbesserte Energieeffizienz um 20% zu senken, und (3) die Energienachfrage mit 20% aus erneuerbaren Energiequellen zu decken. Dem vorausgegangen ist ein Vorschlag der Europäischen Kommission, der u.a. die Emissionen des Verkehrs mit einbezog, der für die Emissionen von Pkw eine Begrenzung auf 120 g CO<sub>2</sub>/km bis 2012 vorsah und eine Option zur Prüfung weiterer Reduktionen nach 2012 (COM 2007).

Mit der „Roadmap for moving to a competitive low-carbon economy in 2050“, veröffentlicht im Mai 2011, versuchte die Europäische Kommission Entwicklungen nach dem Jahr 2020 vorzuzeichnen (COM 2011a). In Bezug auf den Straßenverkehr wird eine nachhaltige Mobilität durch Kraftstoffeffizienz, Elektrifizierung und geeignete Preisgestaltung vorgeschlagen. Drei Hauptfaktoren für die Beeinflussung hin zu technologischen Innovationen werden genannt: (1) Fahrzeugeffizienz durch neue Motoren, neue Werkstoffe und neues Design; (2) Verwendung von umweltschonender Energie durch neue Kraftstoffe und Antriebssysteme; (3) bessere Nutzung von Netzen und sichererer Betrieb durch Informations- und Kommunikationssysteme. Für die genaue Umsetzung mittels umfassender, kombinierter Bündel von Maßnahmen wird auf das „Weißbuch Verkehr“ verwiesen.

Das „Weißbuch Verkehr“ (COM 2011b) enthält Vorschläge zu einem gemeinschaftlichen Vorgehen hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Dabei wird von einem Emissionsminderungsziel im Verkehrssektor von 60% gegenüber 1990 bis zum Jahr 2050 ausgegangen. Bis 2030 könnten die Verkehrsemissionen bis 8% über den Wert von 1990 ansteigen, müssten darauffolgend allerdings sehr stark fallen. Die Zielgrößen mit direkter und indirekter Relevanz für den Pkw-Bereich sind:

- die Halbierung der mit konventionellem Kraftstoff betriebenen Pkw bis 2030, eine vollständige Abschaffung in Städten bis 2050. In städtischen Zentren soll die Stadtlogistik bis 2030 CO<sub>2</sub>-frei sein,
- die Schaffung eines Rahmens für ein europäisches Verkehrsinformations-, Management- und Zahlensystem bis 2020,
- die Senkung der Zahl der Verkehrsunfalltoten bis 2050 auf nahe Null. Bis 2020 soll eine Halbierung der Zahl der Unfalltoten im Straßenverkehr erreicht werden,
- eine Umfassendere Anwendung der Nutzer- bzw. Verursacherfinanzierung im Verkehrsbereich zur Beseitigung von Wettbewerbsverzerrungen und ein größeres Engagement des Privatsektors sowie
- ein EU-weites multimodales transeuropäisches Netz (TEN) mit dazugehörigen Informationsdiensten, das bis 2030 bestehen soll.

## 2.2.2 Entwicklung des Mobilitätsverhaltens

Verkehr, Mobilität und Fahrzeugkonzepte bedingen sich gegenseitig. Verkehr ist das gemeinschaftlich realisierte Mobilitätsbedürfnis, das sich aus einer Abwägung der zur Verfügung stehenden Optionen unter einer Vielzahl von Gesichtspunkten ableitet. Technisch verfügbare und ökonomisch realisierbare Optionen für den Einzelnen sind entscheidend für das individuelle Mobilitätsverhalten. Der Wandel von Lebensstilen, die demographische Entwicklung und die Siedlungsstruktur stellen vergleichbar signifikante Einflüsse dar, deren Trends im Folgenden skizziert werden.

### Lebensstil

Die Soziologie beschreibt mit dem Begriff des Lebensstils Gruppen, die ähnliche Werte, Geschmacksvorstellungen und Verhaltensmuster haben (Deffner 2011). Seit den 1990er Jahren findet das Lebensstil-Konzept auch Anwendung in der Mobilitätsforschung. Es wurden eine Vielzahl von Charakterisierungen von Lebensstilen entwickelt, die im Hinblick auf Mobilität zu so genannten Mobilitätsstilen weiterentwickelt wurden, z. B. das „ISOE-Modell“ (Götz et al. 2003), das „DB-Modell“ (Jäger 1989) oder dem SINUS Marktforschungsinstitut seit den 1980er Jahren. Zusätzlich zum Lebensstil ist die Lebenslage beschrieben durch die Position im Lebenszyklus (z. B. Ausbildung, Familie, Single-Haushalt etc.) ein wichtiger Aspekt zur Erklärung des Mobilitätsverhaltens (Seibt et al. 2010).

Der Personenverkehr wird in Europa hauptsächlich vom Pkw getragen. In Deutschland werden täglich 162 Mio. Wege und rund 2,5 Mrd. Personenkilometer im motorisierten Individualverkehr, d. h. hauptsächlich mit dem Pkw, zurückgelegt (infas-DLR 2010). Zwischen 2002 und 2008 kam es zu einer leichten Zunahme der Personenkilometer, womit sich ein Trendwandel andeutet (ebd.). In anderen europäischen Ländern deutet sich eine Sättigung der Pkw-Nutzung gleichermaßen an. Die pro Kopf zurückgelegte Entfernung in den Ländern der EU-15 stieg zwischen 1999 und 2009 um 2,6%. Die Nutzung hatte ihren Höchstwert in Dänemark 1999, in Frankreich, Spanien und Großbritannien 2002, und in der Schweiz im Jahr 2004 (EEA 2011) erreicht. International kann ein ähnliches Phänomen (z. B. Japan, den Vereinigten Staaten und Australien) beobachtet werden. Dem entgegen steht ein weitergehender gesellschaftlicher Individualisierungs-

prozess in allen Ländern der EU, der die Nachfrage nach der Pkw-Nutzung weiter verstärken sollte (Deffner 2011).

Eine weitere Trendwende wird für den Besitz von Pkw thematisiert. Dieser soll für jüngere Generationen durch einen Wertewandel und zum Teil durch Bequemlichkeit weniger attraktiv werden. Der Pkw verliert seine Bedeutung als Statussymbol und die Möglichkeit, ein Fahrzeug benutzen zu können, wenn es gebraucht wird, reicht aus. Zu beobachten ist dieser Trend heute vor allem in Megacities in Asien, wie z. B. Shanghai. Für die Automobilindustrie werden als Gegenstrategie integrierte Mobilitätskonzepte vorgeschlagen (Kalmbach et al. 2011). In Deutschland ist der Erwerb des Führerscheins für viele Menschen weiterhin das entscheidende Ereignis in der Mobilitätsbiographie. Im Jahr 2008 hatten 88% der Personen im Alter von 18 Jahren und darüber eine Pkw-Fahrerlaubnis im Vergleich zu 84% im Jahr 2002. Altersgruppenspezifisch ist in der Gruppe 18-29 Jahre ein leicht rückläufiger Trend festzustellen, der auf einen Rückgang der Führerscheinquote bei Männern zurückzuführen ist. Diese Tendenz wird von einer steigenden Quote bei Frauen annähernd kompensiert (infas-DLR 2010).

Die genauen Ursachen für Anzeichen der Sättigung der Pkw-Nutzung sind unklar. Eine Kombination von Stau-Häufigkeit, steigende Kraftstoffpreise, eine teilweise sich auswirkende Wirtschaftskrise und weitere verkehrspolitische Maßnahmen können dazu beitragen. Der Zusammenhang zwischen steigendem Wohlstand und Kilometerleistung scheint bei Jahreseinkommen über 22.000€ nicht weiter gegeben zu sein (Millard-Ball et al. 2010; EEA 2011). Zu erkennen ist in Summe eine Reihe von Trends mit Einfluss auf die Pkw-Nutzung. Inwieweit eine Individualisierung mit z. B. sinkenden Haushaltsgrößen, entfernungsintensiven Freizeit- und Konsumaktivitäten, deren Lebensstile zum Teil erst durch die Hilfe des Autos lebbar sind (Deffner 2011), sich auch mit anderen Nutzungsformen des Autos, z. B. im Rahmen von Car-Sharing, sich durchsetzen, ist aus heutiger Sicht unklar.

### **Demographische Entwicklung**

Der Begriff „Demographischer Wandel“ umfasst eine Änderung des Alters und der Struktur der Bevölkerung. Bezogen auf Deutschland beinhaltet dies (1) einen erwarteten langfristigen Rückgang der Bevölkerungszahlen, (2) einen Wandel der Altersstruktur mit einer relativen und einer absoluten Zunahme der Bevölkerung und (3) eine Überalterung der ländlichen Räume (infas-DLR 2010).

Aktuellere Untersuchungen zur Bevölkerungsentwicklung in Europa bestätigen, dass geringe Geburtenraten, eine ansteigende Lebenserwartung und ein weiterer kontinuierlicher Zuzug von Migranten zu einer nahezu unveränderten Gesamtzahl der Bevölkerung im Jahr 2060 führen. Der Altersdurchschnitt wird jedoch sehr stark ansteigen. Letzteres führt dazu, dass das Verhältnis der 15-64jährigen zu den über 65jährigen sich von etwa 4:1 auf 2:1 verringert (COM 2009). Dies entspricht den Prognosen für Deutschland, in denen für das Jahr 2050 65% der Bevölkerung im Altersbereich 18-66 Jahre und 31% 67 Jahre und älter vorhergesagt werden (DSTATIS).

International gesehen fällt die Geburtenrate in allen Weltregionen bis zum Jahr 2050 auf ein ähnlich geringes Niveau. Zwischen 1,5 und 2,5 Kinder pro Frau werden vorhergesehen (UN 2005). Die Gesamtbevölkerung wird von 6,3 im Jahr 2010 auf 9,2 Mrd. Menschen im Jahr 2050 anwachsen (UN 2006). Das Verhältnis der arbeitenden Bevölkerung zu den über 65jährigen entwickelt sich vor allem in China ähnlich wie in Europa (UN 2006). Bemerkenswert ist, dass sich absolut gesehen im Jahr 2050 knapp 80% der Bevölkerung im Alter von 60 Jahren und darüber in Entwicklungsländern, 4% in Schwellenländern und nur 18% in den heutigen Industrieländern befinden werden (UN 2007).

Die jüngste Studie zur Mobilität in Deutschland (MiD 2008) zeigt erste Verschiebungen im Verkehrsverhalten der älteren Bevölkerung. Ältere Menschen legen heute gegenüber 2002 im Schnitt mehr Wege zurück und nutzen verstärkt den Pkw. Die Pkw-Nutzung der jüngeren Bevölkerungsanteile geht leicht zurück. Der Anteil der über 65-jährigen in der Bevölkerung ist zwischen 2002 und 2008 in Deutschland um

16% gestiegen, die Anzahl ihrer Wege ist um 31% gewachsen, ihre durchschnittliche Tagesstrecke ist jedoch nur geringfügig gestiegen. Die Veränderung bei den über 74-jährigen ist vergleichbar deutlich: die Anzahl der Wege stieg um 15%. Der Anteil der Altersgruppe der unter 24-jährigen an der Bevölkerung nahm in diesem Zeitraum um 4% ab, während sich der Anteil der Wege in dieser Gruppe überproportional um 9% verringerte (infas-DLR 2010).

Auch internationale Studien bestätigen den Trend, dass die älteren Bevölkerungsanteile mehr Fahrten pro Tag als heute tätigen und die Nutzung des Pkw zunehmen wird (Arentze, Timmermanns, Jorritsma et al. 2008, in Deffner, 2011). Die Bevölkerungsgruppe der über 65-jährigen verhält sich nicht homogen und es liegen wenige Studien vor, die sich mit Lebensstilen im Alter beschäftigen (Deffner 2011).

### Ländlicher Raum versus Urbanisierung

Im ländlichen Raum ist die Bevölkerung vielfach auf den Gebrauch des Pkw angewiesen, da die Nutzung von ÖPNV nicht praktikabel ist oder ÖPNV-Netze nicht verfügbar sind. Der Pkw-Besitz liegt beispielsweise in der Landeshauptstadt Hannover bei 415 Pkw/1000 Einwohner, während in der umliegenden Region 566 Pkw/1000 Einwohner registriert sind (Region Hannover 2005). Dies gilt in ähnlicher Weise für Deutschland. Der Bestand an Privatautos im ländlichen Raum in Deutschland liegt bei ca. 600 Pkw je 1000 Einwohner. In Kernstädten ist ein Drittel der Haushalte autofrei, in städtisch geprägten Umlandgemeinden knapp 16% und auf dem Land nur knapp 7%. Der Anteil des Besitzes mehrerer Pkw in Kernstädten beträgt ca. 12%, während er in dünner besiedelten Gemeinden des Umlands mehr als 40% beträgt (Schubert 2009). Szenarien für die Mobilität gehen davon aus, dass der Pkw-Besitz in Deutschland in so genannten „schrumpfenden Regionen“ bis zum Jahr 2050 in kleineren Orten bis zu ca. 40% zurückgehen kann, in großen Orten bis zum Jahr 2050 um ca. 15 bis 18% wachsen wird<sup>2</sup> (TRAMP 2006).

International ist ein Trend zur Urbanisierung unverkennbar. Im Jahr 2000 gab es weltweit 18 so genannter Megacities, also Städte mit mehr als 10 Millionen Einwohnern. Im Jahr 2025 soll es weltweit 29 Megacities geben. Im Jahr 2010 lagen zwölf der 21 Megacities in Asien. Die Metropolregion Tokyo hat eine Bevölkerung von 35,4 Millionen, gefolgt von Mumbai (inkl. Agglomeration, 20 Millionen), Delhi (inkl. Agglomeration 17 Mio.), Shanghai (15,7 Mio.), Kolkata (15,5 Mio.), Jakarta (15,2 Mio.), Dhaka (14,6 Mio.), Karachi (13,2 Mio.), Manila (11,7 Mio.), Beijing (11,7 Mio.), Osaka-Kobe (11,3 Mio.) und Istanbul (10,5 Mio.) (Laquian 2008).

Seit dem Jahr 2008 lebt mindestens die Hälfte der Weltbevölkerung in städtischen Gebieten, während es 1950 30% waren. Ein enormes Anwachsen der städtischen Bevölkerung ist für Afrika und Asien prognostiziert. Ausgehend von heute 40% werden dort im Jahr 2050 etwa 60 bis 65% der Bevölkerung in Städten leben. Trotz eines bereits heute hohen Anteils der städtischen Bevölkerung in Europa von circa 73% wird dieser bis zum Jahr 2050 voraussichtlich auf etwa 85% anwachsen. Charakteristisch für Prognosen ist ein starkes Wachstum der Großstädte mit über 5 Millionen Einwohner von circa 40 bis 50% im Zeitraum 2009 bis 2025 und ein Wachstum der kleinen Städte bis 100.000 Einwohner um etwa 40%, während mittelgroße Städte langsamer wachsen. Betrachtet man die 30 bevölkerungsreichsten Länder des Jahres 2009, so hatten im Jahr 1950 sechs Länder bereits eine Urbanisierung von 50%, davon fünf Staaten in Europa. Im Jahr 2009 waren dies bereits 16 dieser Länder, davon nur fünf aus Europa. Für 2050 werden in allen 30 Ländern mehr als 50% der Bevölkerung in Städten leben. In Europa ist keine Veränderung vorhergesehen. Für Frankreich wird die stärkste Urbanisierung global prognostiziert (UN 2010).

---

<sup>2</sup> Bezogen auf das Jahr 2002.



## 2.3 Fahrzeugkonzepte und Markt – Ergebnisse aus den Workshops

Vor dem Hintergrund der im Kapitel 2.2 dargestellten Einflussfaktoren und Trends für die Entwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte wurden in zwei Expertenworkshops die Teilnehmer zu verschiedenen Aspekten für Veränderungen im Bereich des motorisierten Individualverkehrs mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2025 befragt.

### Wie werden sich die Rahmenbedingungen in Bezug auf individuelle Mobilität verändern (Zeithorizont 2025)?

Die Bandbreite individueller spontan priorisierter Einschätzungen zeigen folgende Kurzstatements:

Straßennetz wird nicht wachsen – Umweltgesetze verschärft – Umweltzonen – Verstädterung weltweit – Einstellungen in der Gesellschaft ändern sich – Intermodalität gewinnt an Bedeutung – Dienstleistung wird wichtiger – Infrastruktur als Schlüssel – elektrisch Fahren ist Trend – jeder hat sein Mobilitätskontingent – Marketing stärkere Rolle – Nachfrage nach Mobilität steigt – Maßstäbe, was im Fahrzeug teuer ist, verschiebt sich

### Welche sind die Treiber für Veränderungen im Bereich des motorisierten Individualverkehrs (Zeithorizont ,2025')?

Im Plenum des Expertenworkshops wurde die Frage nach den Treibern für eine Veränderung in nationaler und globaler Hinsicht erarbeitet. Dabei sollten möglichst umfassend Aspekte aus Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt etc. berücksichtigt werden. Das Ergebnis im Hinblick auf Kategorisierung und Nennung von Aspekten ist in Tabelle 2.7 dargestellt.

### Wie werden bzw. wie könnten sich Mobilität und Fahrzeugkonzepte bis zum Jahr 2025 entwickeln?

#### Mensch und Kunde: Verhalten und Nutzen

Im weiteren Verlauf wurde die Frage, wie sich Mobilität und Fahrzeugkonzepte bis zum Jahr 2025 entwickeln könnte, vertieft. Zu den Aspekten bezüglich „Mensch und Kunde: Verhalten und Nutzen“ wurden (a) was darf Mobilität kosten?, (b) Mobility wird verfügbare Commodity, (c) Sicherstellung einer Grundmobilität als wesentliche Fragen bzw. Trends identifiziert. Bei ihrer Bewertung wurde grundsätzlich zwischen Europa und Asien unterschieden. In Tabelle 2.6 sind die Ergebnisse, die als „wahrscheinlich“ eingestuft wurden, dargestellt.

**Tabelle 2.6: Entwicklungen von Mobilität: Mensch und Kunde – Verhalten und Nutzen.**

Kriterien	Europa	Asien
Mobilitätsbudget	stagniert	nimmt zu
Technische Sozialisierung	Verbrennungsmotor	elektrische Antriebe
Flexibilität und Umdenken	schwierig	-
Mobilitätsbedürfnis	steigt	steigt
Image: „grün/öko“ bzw. „first mover“	Zahlungsbereitschaft hoch	-
Mobilitätsdienste und neuartige Geschäftsmodelle	-	-
Mobility wird Commodity	-	-

Anm.: „-“ es wurde keine Bewertung abgegeben.

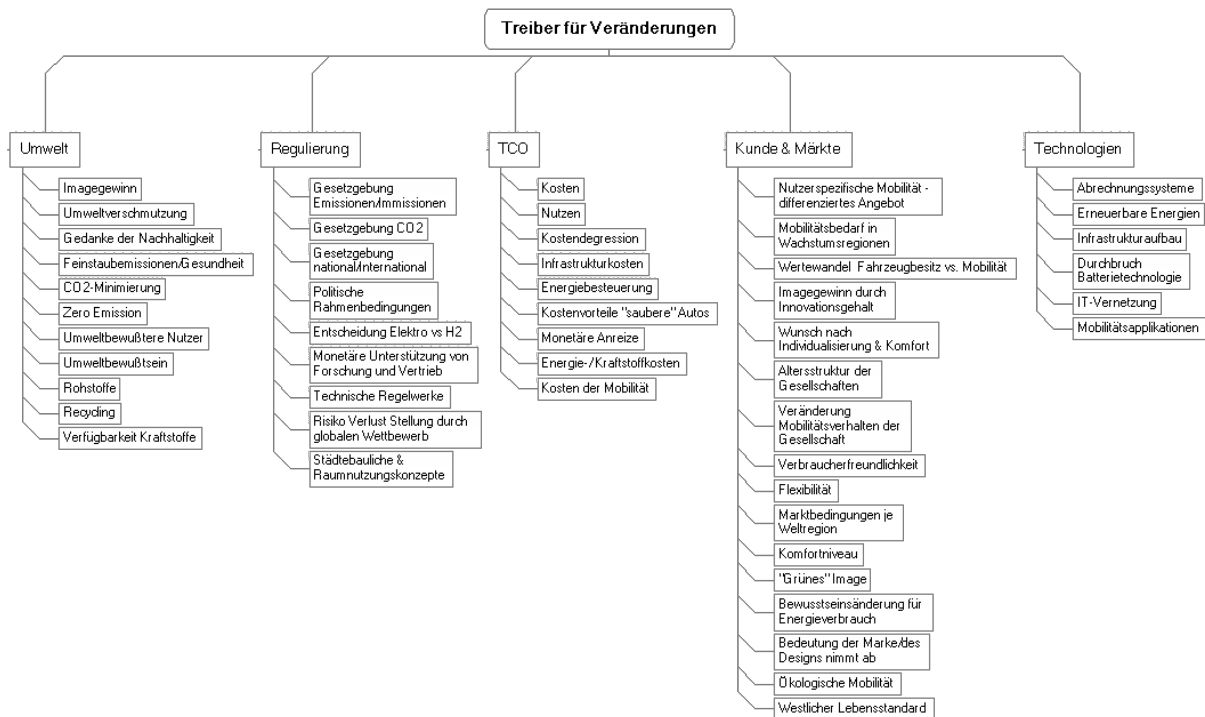
Quelle: AELFA Expertenworkshop.

### Fahrzeugkonzepte: Antworten auf die Treiber

Zur Frage, wie sich Fahrzeugkonzepte bis zum Jahr 2025 als Antwort auf die Treiber entwickeln könnten, wurden wesentliche Diskussionspunkte und Abhängigkeiten identifiziert:

- Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge im Wettbewerb zu batterieelektrischen Konzepten und Bio-Kraftstoffen als zeitliche Frage: 2025 wurde als zu früh eingestuft;
- Kleinstfahrzeuge bieten keine ausreichende Antwort auf Mobilitätsanforderungen; Zweitwagen für Elektromobilität wichtig; 2-Sitzer und Car-Sharing als wesentliche Konzepte.
- Differenzierte Fahrzeugkonzeptbetrachtung nach Region und Segment notwendig

**Tabelle 2.7: Ergebnis des Expertenworkshops 1.1 zur Frage nach Treibern für Veränderungen im Bereich des motorisierten Individualverkehrs mit dem Zeithorizont 2025.**



Quelle: AELFA Expertenworkshop.

Als Schlüsselergebnisse zur Frage, welche Informationen fehlen, um die Marktentwicklung der nächsten 15 Jahre greifbar machen zu können, entstand aus der Expertendiskussion die Aussage: Der Informations- bzw. Forschungsbedarf lässt sich in vier Kategorien einteilen: (1) Marktsegmente, (2) Kundengruppen, (3) Zugang zu Rohstoffen und (4) Geschäftsmodelle. Die vier Kategorien sind jeweils spezifisch für jede in Betracht kommende Weltregion zu beantworten.

## Welche Informationen fehlen, um die Marktentwicklung der nächsten 15 Jahre greifbar machen zu können?

Ausgehend von den Impulsvorträgen „Wasserstoff und Batterien als Energiespeicher in Kraftfahrzeugen“ von Dr. M. Fichtner (KIT) und „Techno-ökonomische Modellierung des Pkw-Neufahrzeugmarkts: Das Fahrzeugtechnik-Szenariomodell *VECTOR21*“ von Dr. S. Schmid (DLR) wurden eine Reihe von Lücken und Defiziten zur Beantwortung der Frage zur Marktentwicklung durch das Expertengremium erarbeitet. Im Folgenden sind wesentliche Punkte der Diskussion dargestellt.

### Allgemeine Fragen

- Entwicklung des Mobilitätsbudgets, national und international, als Begrenzung möglicher Marktdurchdringungen
- Kundennutzen der Mobilität: heute vs. morgen
- Primäre Entwicklungsziele: private Kunden oder Flottenbetreiber, in Abhängigkeit einer zukünftigen Förderpolitik der Elektromobilität
- Wie ist der Einfluss neuer Geschäftsmodelle/Mobilitätskonzepte? Z. B. Car-Sharing, E-Fahrzeug
- Wie entwickeln sich die Ladetechnologien: Ladezeit „Tanken“ versus Nutzungszeit?

### Konkrete Anmerkungen im Hinblick auf den DLR-Szenarioansatz

- Basis-Berechnungsmodell: Konzept der ‚Relevant-cost-of-ownership‘ gegenüber den ‚Total-cost-of-ownership‘ eventuell entscheidend. Beispielsweise sollten Wartung- und Reparaturkosten in den RCO-Ansatz mit aufgenommen werden.
- Einsatzmöglichkeiten von gebrauchten Fahrzeugbatterien und ihrem Restwert z. B. Second-Life Kosten von Batterien für Elektrofahrzeuge bzw. die Lebensdauer des Fahrzeugs und sein Restwert sollte mit in Betracht gezogen werden.
- Zusammensetzung der Zahlungsbereitschaften und ihre Abhängigkeiten zum Restwert verbessern.
- Klärung der Wahrscheinlichkeit der Annahmen, welche u. U. zur Verteilung der Konzepte führen.
- Erweiterung des Fahrzeugkonzepte/-klassen Ansatzes je Nutzer: es sollten mehrere bzw. eine Verteilung berücksichtigt werden.
- Erhebung von Marktsensitivitäten bzgl. des Marktumfeldes: Die Betrachtung gesättigter im Vergleich zu neu entstehenden Märkten erscheint wichtig. Erweiterung des Modellansatzes auf andere Weltregionen und Klimazonen wird empfohlen.
- Nicht monetäre Anreize sollten im Kaufentscheidungsmodell berücksichtigt werden.
- Fördermaßnahmen für Forschung und Entwicklung sollten für die Entwicklungsgeschwindigkeit und Kostendegressionspotentiale berücksichtigt werden.
- Die Abbildung der Verfügbarkeit und Netzdichte der Energieversorgung inklusive Wasserstoff, deren Infrastrukturkosten und ihrer Varianten einer Umlage auf Verbraucherpreise sollte verbessert werden.
- Spezielle Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Traktionsstroms in Abhängigkeit von anderen, parallelen politischen Zielen, davon abhängig evtl. Anrechnung einer CO<sub>2</sub>-Kfz-Steuer für E-Mobile.

Aktualisierte DLR-Szenarien für den deutschen Pkw-Markt sind in Kapitel 6 dargestellt. Es konnten nicht alle Anregungen und Kritikpunkte aufgenommen werden, da sie teilweise einen wesentlichen Forschungsaufwand bedeuten, der im Rahmen dieser Studie nicht bearbeitet werden konnte.

### 3 Analyse von Antriebskomponenten

Die zunehmende Elektrifizierung von Straßenfahrzeugen führt dazu, dass das gegenwärtige kosten- und wertschöpfungsbestimmende Fahrzeugteilsystem, der Antriebstrang, veränderte Kernkompetenzen erfordern wird. Die Wertschöpfung am Verbrennungsmotor inklusive seinem Getriebe wird Marktanteile an die neuen Komponenten Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik abtreten. Der Getriebeanteil wird sich dabei signifikant ändern.

Heutige Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor können im Vergleich mit Hybrid- und Elektrofahrzeugen auch schon als zum Teil elektrifiziert betrachtet werden. Die Batterie und die Bordnetzkomponenten, elektrische Maschinen wie Starter und Generator und deren Getriebe, aber auch elektronische Steuergeräte zusammen mit Leistungselektroniken im kW-Bereich werden unter automobilen Anforderungen hergestellt und eingesetzt. Hier sind Fertigungsverfahren etabliert, die in den Vergleich mit „höher“ elektrifizierten Fahrzeugen mit einbezogen werden können.

Die erste und einfachste Stufe in der Elektrifizierungsskala stellen Fahrzeuge mit Start-Stopp-Automatik dar. Im einfachsten Fall besitzen sie ein modifiziertes Motorsteuergerät, das den Starter und gegebenenfalls den Generator mit einem speziellen Energiemanagement-Verfahren ansteuert (Korte et al. 2008), in weiterer Ausprägung ist fast das gesamte Energiemanagement des Fahrzeuges mit Batteriemangement, Verbrennungsmotor-Thermomanagement und Generatorkonzept einbezogen. Verschiedene Ausführungsformen erlauben dabei das Abschalten des Verbrennungsmotors nur im Stillstand oder auch in den Segelphasen. Diese „Mikro“-Hybridisierung hat bei überschaubarem Aufwand einen relativ hohen Nutzen.

Die weiteren Stufen der Elektrifizierung sind allgemein als Mild-, Full- oder Plug-In-Hybridisierungen bekannt und sind durch ihren größer werdenden Systemanteil an Batterie-, Motor- und Leistungselektronik gekennzeichnet, ebenso durch weitere Funktionen vom Boosten bis hin zum rein elektrischen Fahren. Bei diesen Konzepten arbeiten Verbrennungsmotor und Elektromotor parallel auf einen Antriebstrang.

**Tabelle 3.1: Realisierbare Betriebszustände von Hybridantrieben.**

Funktionen	Micro	Mild	Full
Start-Stopp	✓	✓	✓
erweiterte Generatorregelung	✓	✓	✓
Rekuperation		✓	✓
Betrieb elektrischer Nebenaggregate		✓	✓
elektrisches Fahren		Kurz	✓
aktiver Boostbetrieb			✓

Quelle: DLR.

Elektrofahrzeuge haben in dieser Klassifizierung den größten Anteil an Batterie, Elektromotor und Leistungselektronik. Brennstoffzellenfahrzeuge verlagern einen Teil des Aufwandes für die Batterie in die Brennstoffzelle, ist der Anteil klein, kann man hier auch von einem Brennstoffzellen-Range-Extender-Fahrzeug sprechen. Wird der Range-Extender durch einem Verbrennungsmotor angetrieben, gelangt man von der Zusammensetzung der Komponenten her wieder zum seriellen Hybrid, je nach Größe und Aufwand.

In den vergleichenden Betrachtungen im Anhang werden die jeweiligen Anteile der Komponenten am Gesamtfahrzeug, der Fertigungsverfahren sowie der Materialien für verschiedene Fahrzeugkonzepte quantifiziert.

### 3.1 Verbrennungsmotor

Im Folgenden wird ein Überblick über verschiedene effizienzsteigernde Maßnahmen am Verbrennungsmotor gegeben, wobei der Fokus auf Downsizing, Aufladung, Reibungsminderung und konstruktive Aspekte gelegt wird. Anschließend werden die spezifischen Anforderungen, die sich aus den unterschiedlichen Antriebskonzepten Parallel-Hybrid, serieller Hybrid und batterieelektrisches Fahrzeug mit Range-Extender für die eingesetzten Verbrennungsmotoren ergeben, dargestellt. Abschließend wird der Forschungsbedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren abgeleitet.

#### 3.1.1 Effizienzsteigernde Maßnahmen bei Verbrennungsmotoren

Die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs stellt neue Herausforderungen an die Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Die steigende Anzahl an Antriebsvarianten mit unterschiedlichen Hybridisierungsgraden erfordert Motorkonzepte, die speziell auf die Anforderungen des Fahrzeugkonzepts ausgelegt sind. Die Bandbreite der notwendigen Motorleistungen wird dadurch größer. Eine zentrale Herausforderung in der Entwicklung und Produktion von Verbrennungsmotoren ist daher die Bereitstellung von skalierbaren Motorkonzepten, bei denen aufbauend auf einem Grundmotorkonzept verschiedene Varianten realisiert werden können. Die Differenzierung kann beispielsweise durch Art des Kraftstoffs, Aufladung, Anpassung der Zylinderzahl oder der Motorsteuerung erfolgen (Sorgner et al. 2011). Tatsächlich bleibt der Verbrennungsmotor aber in absehbarer Zeit die wichtigste Komponente im Antriebsstrang und weist durch Einsatz innovativer Entwicklungen noch ein erhebliches Potential zur Effizienzsteigerung (Mauch et al. 2011) mit Kraftstoffeinsparpotentialen bis zu 30% auf (WM-BW 2010). Voraussetzung hierfür ist eine weitere Wirkungsgradoptimierung, die meist auch Downsizing mit einschließt (Schmid et al. 2011). Im Vordergrund der Entwicklung für einen guten Wirkungsgrad sind die thermodynamische Optimierung zur Verbesserung des Verbrennungsprozesses und die mechanische Optimierung zur Verringerung von Reibung und Gewicht des Motors (Korte et al. 2008). Aktuelle Trends und Herausforderungen in der Entwicklung von Verbrennungsmotoren sind:

- Verkleinerung des Hubraums (Downsizing) bei gleichbleibender Leistung
- Turboaufladung und Direkteinspritzung
- Reduzierung der Motorreibung z. B. durch geringere Motordrehzahlen („Downspeeding“)
- (Voll-)Variabler Ventiltrieb
- Zylinderabschaltung, Verringerung der Zylinderzahl

- Verbesserte Brennverfahren im Teillastbereich (Diesotto, HCCI)
- Elektrifizierung der Nebenaggregate
- Abgasnachbehandlung zur Einhaltung der Emissionsnormen

### 3.1.1.1 Downsizing

Downsizing beschreibt Verfahren, bei denen Motoren mit kleinem Hubraum gleiche Werte bezüglich des Fahrverhaltens erreichen wie hubraumgroße Motoren. Dieser Ansatz ist gut geeignet, um Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei gleicher Fahrdynamik zu senken (Korte et al. 2008). Die wesentlichen technischen Gründe für die Verbrauchsabsenkung werden in einer verringerten Motorreibung, geringeren Ladungswechselverlusten sowie dem Betrieb in thermodynamisch günstigeren Betriebspunkten gesehen (Junker 2011), ein weiterer Vorteil ist das geringere Motorgewicht (Königstein et al. 2008). Für eine möglichst effiziente Absenkung der inneren Reibung wird in die Reduktion des Hubraums bei Downsizing-Konzepten auch die Verringerung der Zylinderzahl einbezogen (Roß et al. 2010). Das bietet durch kleinere Maßkonzepte einerseits die Chance, das Aggregategewicht zu reduzieren und erleichtert andererseits weitergehende Fahrzeugmaßnahmen wie zum Beispiel den Einsatz der Hybridtechnik. Allerdings kann bei starken Hubraumabsenkungen die Darstellung komplett neuer Motoren bzw. Motorenfamilien erforderlich werden (Schommers et al. 2011).

Damit die Reduzierung des Hubraums nicht zu einem Leistungs- bzw. Drehmomentmangel führt, werden häufig zusätzlich ein Kompressor und/oder ein Turbolader verwendet. Um auch die bisherigen großvolumigen Motoren mit sechs Zylindern durch entsprechend kleinere Vierzylindermotoren zu ersetzen, sind hohe spezifische Leistungen von über 100 kW/l sowie ein diesen Komfortantrieben entsprechendes instationäres Verhalten mit fülligen dynamischen Drehmomentkurven im unteren Drehzahlbereich zu realisieren (Adomeit et al. 2010). Die Drehmomentcharakteristik und ein gutes Ansprechverhalten sind dabei nicht nur Schlüsselfaktoren für eine hohe Akzeptanz durch den Kunden, sondern auch notwendig, um eine lange Gesamtübersetzung zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauches umsetzen zu können (Königstein et al. 2008).

Die Vorteile des Downsizings lassen sich prinzipiell in einen thermodynamischen und einen mechanischen Anteil trennen. Aus thermodynamischer Sicht wird bei der Reduktion des Hubvolumens der Arbeitsbereich des Verbrennungsmotors zu höheren Lasten und damit zu besseren spezifischen Verbräuchen verschoben (Schommers et al. 2011). Die thermodynamische Entwicklung beinhaltet daher unter anderem (Korte et al. 2011b):

- die Optimierung von Verdichtungsverhältnis und Brennraumform,
- die Optimierung von Zündzeitpunkt und Phasenlage der Ventilsteuerzeiten,
- die Verbrennungsentwicklung für die Benzindirekteinspritzung sowie
- die Auslegung der Turboladerkonfiguration.

Auf der Mechanikseite ist es die geringere Reibung der Kolbengruppe bzw. der Entfall eines oder mehrerer Zylinder, die sich positiv auf den Verbrauch auswirken (Schommers et al. 2011).

Neben gemeinsamen Herausforderungen beim Downsizing von Diesel- und Ottomotoren bestehen auch Unterschiede. Ein hohes Verdichtungsverhältnis ist bei Ottomotoren Voraussetzung für einen guten Wirkungsgrad. Diese Anforderung führt zu einer weiten Verbreitung der Benzindirekteinspritzung bei moder-

nen Motoren (Korte et al. 2011a) und beschreibt in Kombination mit Abgasturboaufladung und Nockenwellenversteller auf Ein- und Auslassseite den Stand der Technik (Königstein et al. 2008). Nach Korte (2011a) sind die Herausforderungen für die Realisierung eines hohen Downsizinggrads eines Ottomotors bei gleichzeitig bestmöglichem Wirkungsgrad:

- ein hohes stationäres Drehmoment sowie ein gutes instationäres Verhalten, insbesondere bei niedrigen Drehzahlen
- die Optimierung der Klopfneigung im Bereich hoher Lasten, um ein möglichst hohes Verdichtungsverhältnis bzw. eine günstige Verbrennungslage zu realisieren als Voraussetzung für einen guten Wirkungsgrad sowie für ein hohes stationäres Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen
- weiter reduzierte Ladungswechselverluste im Teillastgebiet, Entdrosselung
- bei hohen Lasten und Drehzahlen ein möglichst kleiner Bereich, in dem zum thermischen Bauteilschutz auf der Abgasseite eine Anfettung notwendig ist.

Durch die Qualitätsregelung entfällt beim Dieselmotor die beim Ottomotor angeführte Verbesserung des Motorprozesses infolge Entdrosselung. Dadurch ist das Downsizingpotential des Dieselmotors grundsätzlich geringer als beim Ottomotor (Schommers et al. 2011). Die Lastanhebung in verbrauchsgünstigere Kennfeldbereiche führt aber auch hier zu einer Verbrauchsverbesserung. Die Reduzierung des Hubraums ist bis zu einem Punkt möglich, an dem weitere Hubraumverringerungen durch motorinterne Maßnahmen zur Einhaltung der NO<sub>x</sub>-Grenzwerte wieder zu einer Verbrauchsverschlechterung führen (Schommers et al. 2011). Zur konsequenten Durchführung des Downsizings beim Dieselmotor sollte daher die Hubraumreduktion mit einer Reduzierung der Zylinderzahl einhergehen. Auf diese Weise ergeben sich weitere Vorteile durch die Beibehaltung eines optimalen Brennraumvolumens von ca. 0,5 l, das einen höheren Wirkungsgrad aufgrund geringerer Wandwärmeverluste aufweist (Mauch et al. 2011). Als Schlüsselkomponenten und -technologien für das Downsizing von Dieselmotoren dienen (Mauch et al. 2011; Schommers et al. 2011):

- die Aufladegruppe: Steigerung des Ladedrucks für ein verbessertes Dynamikverhalten sowie zur Darstellung hoher AGR-Raten
- Hochdruckeinspritzsysteme > 2000 bar mit hohem hydraulischem Wirkungsgrad zur Anhebung der spezifischen Leistung und Begrenzung der Schadstoffemissionen
- optimaler Verbrennungsschwerpunkt im volllastnahen Bereich für verringerte Abgastemperaturen und Verbräuche
- Niederdruck-AGR: niedrige Stickoxidemissionen bei verbesserter Dynamik und geringerem Verbrauch
- Abgasnachbehandlungssysteme für verringerte Stickoxidemissionen
- Anfahrunterstützung: Überwindung des kritischen Bereichs bei niedriger Drehzahl; zum Beispiel durch Verwendung eines mechanischen oder elektrischen Kompressors, milde Hybridisierung etc.
- Komfortmaßnahmen: Verbesserung des Schwingungsverhaltens, zum Beispiel durch ein Zwei-Massen-Schwungrad mit integriertem Fliehkraftpendel

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass das Downsizing auch beim Dieselmotor zunehmende Bedeutung gewinnt. Offen ist die Frage, in welchem Umfang additive Technologien insbesondere zur Ein-

haltung der Emissionslimits und zur Gewährleistung eines angemessenen NVH-Verhaltens bei Motoren mit geringerer Zylinderzahl angewandt werden müssen (Schommers et al. 2011). Letztendlich werden sowohl beim Diesel- als auch beim Ottomotor Kriterien wie Integration in eine Motorenfamilie, Möglichkeit der Darstellung von leistungsstärkeren Varianten sowie die unbedingte Notwendigkeit, mit diesem Aggregat bestmögliche CO<sub>2</sub>-Emissionen darzustellen, über die auszuwählende Downsizingvariante entscheiden (Weinowski et al. 2009).

### 3.1.1.2 Aufladung

Aufladung ist zusammen mit der Benzindirekteinspritzung und der Ventiltriebsvariabilität eine Kerntechnologie für Downsizing (Korte et al. 2011a). Durch Aufladung kann bei kleineren Basismotoren eine sehr hohe spezifische Leistung zur Darstellung verschiedener Varianten genutzt werden. Zur Erreichung einer großen spezifischen Leistung sind jedoch hohe, über heutige Werte hinausgehende Aufladegrade erforderlich (Adomeit et al. 2010). Eine für den jeweiligen Einsatzzweck angepasste Aufladung ermöglicht:

- Konzentration auf wenige identische Grundmotoren im Portfolio (Zylinderzahl, Hubraum) für verschiedene Einsatzzwecke und Leistungsbereiche; dies trägt zur Reduktion der Kosten und des Entwicklungsaufwands bei
- Differenzierung von Motoren durch Aufladesystem und Motorsteuerung
- Optimierung des Abgasturboladers auf den Hochlastbereich durch mehrstufige Aufladung oder den Einsatz von elektrischen Ladern im unteren Drehzahlbereich

Wird eine Aufladung adaptiert, muss bei Ottomotoren das Verdichtungsverhältnis aufgrund der höheren Klopfneigung des Motors angepasst werden. Dies reduziert den Wirkungsgrad des Motors entsprechend. Außerdem erfolgt eine Erhöhung des Reibmitteldruckes aufgrund der Berücksichtigung eines erhöhten Spitzendrucks und damit notwendige Verstärkung des gesamten Kurbeltriebes, was ebenfalls kraftstoffverbrauchserhöhend wirkt (Weinowski et al. 2009). Damit die notwendige Luftmenge für die gewünschte Motorleistung erreicht wird, stehen hauptsächlich zwei Techniken zur Auswahl: die mechanische Aufladung oder die Turboaufladung durch die Abgasenergie (Lau et al. 2011). Es existieren verschiedene Systeme, die dafür zum Einsatz kommen können (Korte et al. 2011a): einstufige Turboaufladung, zwei- oder mehrstufige Turboaufladung, Kombination von Turboaufladung mit mechanischem Kompressor und Kombination von Turboaufladung und elektrischem Kompressor. Die Referenz bei den Abgasturboladern (ATL) bildet der Festgeometrie-Turbolader mit Wastegate zur Regelung der Turbinenleistung, der bei verhältnismäßig geringem Aufwand die heute üblichen Volllastanforderungen erfüllt (Adomeit et al. 2010). Im nächsten Schritt sind hier ein- und zweistufige Lader – auch mit variabler Turbinengeometrie – einsetzbar, die bei Steigerung der Performance, aber auch des nötigen Aufwands, noch Verbesserungspotential bieten (Adomeit et al. 2010). Der (mehrstufigen) Aufladung kommt nach Mauch (2011) insbesondere beim Dieselmotor eine wichtige Rolle zu, da neben spezifischer Leistung und spezifischem Drehmoment, welche zur Kompensation des geringeren Hubraums benötigt werden, auch die Dynamik des Fahrzeugs durch ein spontanes Ansprechen des kleinen Turboladers verbessert werden. Zudem ermöglicht die Aufladung aufgrund des Aufstauverhaltens der Turbine hohe Abgasrückführungsraten bis hin zur oberen Teillast. Die Herausforderungen von aufgeladenen Pkw-Motoren mit Abgasturbolader lassen sich prinzipiell folgenden Punkten zuordnen (Roß et al. 2010):



- geringes Drehmoment bei niedriger Motordrehzahl, zudem – abhängig vom Betriebspunkt – teilweise träges dynamisches Verhalten
- partiell schlechter Wirkungsgrad der Aufladeinheit mit entsprechender Auswirkung auf den Gesamtwirkungsgrad, insbesondere bei Einsatz eines Wastegates zur Leistungsstellung an der Turbine
- unerwünschte Rückwirkung auf die Prozessführung des Verbrennungsmotors, Erhöhung des Abgasgedrucks

Der Zwang zu Gewichtseinsparungen führt auch beim Abgasturbolader (ATL) zur Diskussion von neuen Werkstoffen, beispielweise zum Einsatz von Kunststoffen statt Aluminium im Verdichtergehäuse (Schick et al. 2009). Während Standard-Verdichtergehäuse bei einfacher Form häufig aus kostengünstigem Aluminium-Druckguss hergestellt sind, erfordern komplexere Formen mit Hinterschneidungen deutlich aufwändigere Kokillengussverfahren. In (Schick et al. 2009) wird ein dreiteiliges Verdichtergehäuse aus einem Hochleistungskunststoff vorgestellt, dessen Gewicht gegenüber dem Alu-Bauteil um 30% reduziert werden konnte. Aufgrund der geringeren Wärmeverluste von Kunststoff gegenüber Aluminium ist zusätzlich die Steigerung des Verdichterwirkungsgrades möglich.

Sowohl der mechanische als auch der elektrische Verdichterantrieb bieten transient dynamisches Potential und erlauben in Kombination mit ATL eine leistungsorientierte Auslegung des Turboladers. Ein frei platzierbarer, elektrisch angetriebener Verdichter weist gegenüber dem an den Motor-Riementrieb gebundenen mechanischen Verdichter Vorteile hinsichtlich Package auf. Der sogenannte eBooster kann jedoch durch die Leistungsfähigkeit des elektrischen Systems eines Fahrzeugs hinsichtlich der Wiederholbarkeit der Zusatzaufladung limitiert sein. Bei Aufladesystemen mit mechanischem Verdichter und ATL ist in den aktuellen Konzepten die Nutzung des Kompressors auf niedrige Drehzahlen beschränkt, und eine echte zweistufige Aufladung im Nennleistungsbereich scheint auch mit Blick auf den Verbrauch nicht sinnvoll (Adomeit et al. 2010).

Der mechanische Kompressor rotiert typischerweise mit einer festen Übersetzung zum Motor und sorgt so für einen schnellen Ladedruckaufbau unter allen Betriebsbedingungen. Da er nicht von der verfügbaren Abgasenergie abhängig ist, kann er unabhängig von Abgastemperatur und -druck Frischluft fördern (Lau et al. 2011). Für die Wirkungsgradoptimierung des Kompressors existieren vier Entwicklungsansätze: die Verbesserung des thermodynamischen Wirkungsgrads, des volumetrischen Wirkungsgrads, des mechanischen Wirkungsgrads und der Betriebsstrategie (Lau et al. 2011).

- Thermodynamisch: aufgrund aktueller Temperaturgrenzen kann das Druckverhältnis nur erhöht werden, wenn die Austrittstemperatur durch einen verbesserten thermischen Wirkungsgrad gesenkt wird (Mastrangelo et al. 2011).
- Optimierung volumetrische Effizienz: für mechanische Lader ist ein zur Drehzahl stetig steigender volumetrischer Wirkungsgrad typisch, da bei steigendem Luftdurchsatz die interne Leckage relativ gesehen kleiner wird. Bei stark hubraumreduzierten Motoren liegt einer der Schlüsselfaktoren in der volumetrischen Verbesserung im niedrigen Drehzahlbereich, um die Drehmomentkurve zu glätten, den Bypass-Massenstrom bei hohen Drehzahlen zu reduzieren und den thermischen Wirkungsgrad zu erhöhen.
- Mechanischer Wirkungsgrad: Im Rahmen aktueller Entwicklungen werden derzeit die PTFE-Dichtungen für eine noch höhere Laderdrehzahl bei gleichzeitig reduzierten mechanischen Verlusten optimiert. Ziel ist, die Kennfeldbreite des Kompressors zu erweitern, um einen kleineren Lader mit geringerem Bauraumbedarf und weniger Gewicht bei gleichbleibendem Luftdurchsatz verwenden zu können. Weitere Optimierungsprogramme sind die Entwicklung von Zahnrädern aus Ver-

bundwerkstoffen für Reibminimierung und besseres NVH-Verhalten sowie die Verwendung erweiterter Leichtlauföle.

- Betriebsstrategie: Das Bypassventil zur Regelung der Luftmenge ist ein kritisches Bauteil innerhalb des Ladersystems, da der Lader nicht die exakt benötigte Luftmenge bereitstellt. Um die Verlustleistung durch Abblasen zu minimieren, werden verschiedene Ansätze verfolgt: der Teillastbetrieb unter Vakuum, eine Kupplung für den Lader und der Antrieb durch ein Mehrganggetriebe oder ein kontinuierlich variables Getriebe (Continuously Variable Drive – CVD).

### 3.1.1.3 Reibungsminderung

Die Reduzierung von Reibungsverlusten in Verbrennungsmotoren und Antriebssystemen ist zwingend erforderlich, um künftige CO<sub>2</sub>-Emissionsvorgaben einzuhalten (Artur et al. 2010). Sie ist ein zentrales Entwicklungsziel für zukünftige Motorkonzepte bei Verbrennungsmotoren. Dies zeigt sich auch daran, dass bei neuen Motorengenerationen trotz steigender spezifischer Leistung und Drehmomente die innermotorischen Reibungsverluste im Vergleich zu der Vorgängergeneration in der Regel verringert werden (Rückauf et al. 2009).

Der gesamte Rumpfmotor mit Kolben, Kolbenbolzen, Ringen, Pleuel und Kurbelwelle hat mit ca. 40-50% den größten Anteil an den innermotorischen Reibungsverlusten (Rückauf et al. 2009; Fahr et al. 2011). Die Reibungsminimierung im Grundmotor führt unmittelbar zum Kolbensystem bestehend aus Kolbenringen, Kolben und Zylinderlaufflächen, welches Potential zur Reibungsreduzierung bietet. Da der mechanische Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors stark durch die Reibungssituation zwischen Kolben/Kolbenring und Zylinderlauffläche beeinflusst wird, kommt den Eigenschaften der Zylinderlauffläche besondere Bedeutung zu (Gand 2011). Sie ist ein wesentlicher Baustein zur Optimierung des komplexen Tribologiesystems (Fahr et al. 2011). Einen Beitrag zur Reibungsminimierung im Kolbensystem können auch konstruktive Optimierungsmaßnahmen wie zum Beispiel Kolbenform und Honung liefern (Rückauf et al. 2009). Außer an einer weiteren Entwicklung des vor allem sehr wirtschaftlichen und prozesssicheren Gleithonverfahrens wird auch an Alternativen zur Oberflächenstrukturierung gearbeitet. Beim so genannten „Laserhonen“ wurde das Strukturieren bereits im Jahre 2000 in die Serie umgesetzt. Eine weitere Anwendung der Lasertechnik in der Serie ist das Laserbelichten, wobei nicht nur die Topographie, sondern auch die Werkstoffeigenschaft im oberflächennahen Bereich verändert wird (Schmid 2010). Auch dieses Verfahren wurde durch die Entwicklung einer speziellen Vorbearbeitung bereits in die Serie begleitet. Zurzeit wird das Einbringen feinerer Laserstrukturen auf seine Großserienfähigkeit und Anwendbarkeit untersucht (Schmid 2010). Der Maßnahmenkatalog zur Minderung der Verluste am Kolben umfasst weiterhin die gewichtsreduzierte Kolbenkonstruktion mit den geräusch- und reibungsoptimierten, beschichteten Kolbenschaften (Fahr et al. 2011) und neue Beschichtungsverfahren für Zylinderlaufflächen und Kolbenbolzen (Junker 2011) mit guten thermomechanischen Eigenschaften, geringem Verschleiß und geringer Reibung (Gand 2011).

Der Reibungsanteil des Ventiltriebs an der mechanischen Gesamtreibung von Ottomotoren liegt derzeit im Bereich von bis zu 20% (Rückauf et al. 2009). Ventiltriebe besitzen besonders in Bereichen von NEFZ-relevanten niedrigen Drehzahlen und Lasten einen hohen Reibungsanteil, der zu steigenden Drehzahlen und Lasten deutlich abnimmt. Beim Reibungsvergleich zwischen Vierventil- und Zweiventilmotoren ist die deutliche Mehrreibung im Ventiltrieb bei den Vierventil-Motoren nennenswert (Weinowski et al. 2009). Hinsichtlich des Ventiltriebsystems werden auch der Einfluss der Reibung und die Öldurchflussmenge im Zylinderkopf systematisch untersucht und optimiert (Artur et al. 2010). In den vergangenen zehn Jahren wurden beispielsweise Ventilbetätigungselemente wie Flachstößel gegen Rollenschlepphebel oder Rollenkipphebel ausgetauscht. Ein weiterer Schritt zur Reduzierung von Reibungsverlusten im Ventiltrieb ist die Anwendung von Wälzlagern im Bereich der Nockenwellenlagerstellen (Artur et al. 2010). Die Reduzierung der Hauptlagerreibung der Nockenwellen kann grundsätzlich auf zwei Arten erfolgen. So können die Lagerbelastungen durch geringere Komponentengewichte und niedrigere Ventildfederkräfte reduziert werden.

Durch den Einsatz von Leichtbauventilen lassen sich so Reibleistungsreduzierungen von bis zu 60 W pro Zylinder bei vier Ventilen und 90 °C Öltemperatur erzielen (Rückauf et al. 2009). Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Leichtbauventils ist, dass für die resultierende Reibleistungsreduzierung keine konstruktiven Änderungen am Zylinderkopfdesign vorgenommen werden müssen. Ein weiterer Ansatz ist die direkte Reduzierung der Lagerreibung durch den Einsatz einer Beschichtung oder einer Wälzlagerung im Bereich der Wellenlagerung (Rückauf et al. 2009). Der Einsatz von Wälzlagern trägt hierbei nicht allein zur Reibungsreduzierung bei. Durch den Wegfall der hydrodynamischen Gleitlager vermindert sich die zur Schmierung erforderliche Ölmenge im Zylinderkopf, wodurch die Förderleistung der Ölpumpe abgesenkt oder die Ölpumpe verkleinert werden kann (Rückauf et al. 2009; Artur et al. 2010). Auch der Einsatz einer vollvariabel regelbaren Ölpumpe kann zur Verminderung der Verlustleistung beitragen (Junker 2011). Mit diesen Maßnahmen kann der Reibungsverlust für einen kleinen Vierzylindermotor pro Nockenwelle durchschnittlich um ca. 20 W, bei kaltem Öl um bis zu 80 W reduziert werden (Artur et al. 2010). Die CO<sub>2</sub>-Reduktion bei einem Vierzylinder-Motor beträgt nach Artur (2010) ca. 0,5 bis 1%, nach Rückauf (2009) kann durch den Einsatz der wälzgelagerten Nockenwelle oder alternativ Leichtbauventilen sowie optimierten Kolben und Kolbenringpaketen Verbrauchsvorteile im NEFZ von über 2% aufgezeigt werden.

Start-Stopp-Systeme erhöhen bei regelmäßiger Verwendung die Zahl der Zyklen, bei denen Kurbelwelle und Lagerschalen eine Phase der Mischreibung durchlaufen. Für die Kurbelwellen-Lagerschalen und die Pleuellager kann das häufige, schnelle Drehbewegungen vor dem vollständigen Aufbau eines hydrodynamischen Films bedeuten. In dieser Mischreibungssituation kommt es zum Festkörperkontakt zwischen der Oberfläche der Kurbelwelle und der Laufschiene des Gleitlagers. Was bei der bisher üblichen Zahl an Startvorgängen eines Fahrzeugs völlig unproblematisch war, kann bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-Systemen neue technische Lösungen verlangen, um einen vorzeitigen Lagerverschleiß zu verhindern. So müssen künftige Motoren mit Start-Stopp-System für 250.000 bis 300.000 Startzyklen ausgelegt sein, während Lagerschalen in klassischen Motoren auf weniger als 100.000 Zyklen ausgelegt werden (Adam et al. 2010). Auch durch Beschichtungen kann ein vorzeitiger Verschleiß, den metallische Gleitflächen unter solchen Betriebsbedingungen zeigen, verhindert werden.

Die mechanische Ansteuerung der Nockenwellen erfolgt je nach Konzept durch Steuerkette oder Zahnriemen. Der Zahnriemen hat wegen seiner guten Dämpfungseigenschaften Vorteile in Bezug auf Akustik und er reagiert im Vergleich zur Kette auf hohe dynamische Lastspitzen gutmütig ohne verschleißbedingte irreversible Längung (Tiemann et al. 2009). Hinsichtlich der Reibungseigenschaften von Zahnriemen und Steuerkette widersprechen sich aktuelle Veröffentlichungen. Nach Tiemann (2009) schneiden alle untersuchten Riemenlayouts in Reibungsmessungen im gesamten Drehzahlbereich besser als der Kettentrieb ab, was auf grundsätzlich günstigere Reibbedingungen der Führungs- und Spannelemente im Steuertrieb durch den Einsatz von reibgünstigen Rollen gegenüber Gleitkontakten bei Kettentrieben zurückgeführt wird. Fink (2011) beschreibt dagegen einen Vergleich eines optimierten Kettentriebs mit einem optimalen Zahnriementrieb, in dem Reibungsvorteile beim Kettentrieb liegen. Die Reibung innerhalb der Kettengelenke wird demnach maßgeblich durch die tribologischen Partner in der Kontaktstelle sowie die Art und Größe der Belastung beeinflusst. Wichtig ist auch die Geometrie der Führungsschienen, da eine Abweichung in den Schienengeometrien eine direkte Auswirkung auf die Normalkräfte zwischen Kette und Führungselement und dadurch auch auf die Reibkräfte hat. Durch neue Materialien und Fertigungsverfahren bei Kette und Führungselementen sowie einer optimierten Basisauslegung des Kettentriebs lassen sich Reduktionen der Reibleistung von 500 bis 1000 W erzielen (Fink et al. 2011). Auch Ölpumpen in Motoren werden heute überwiegend mit einer Kette angetrieben. Eine aktuelle Innovation ist die Entwicklung eines Zahnriemens, der die Ölpumpe im Motoröl ohne Spannelement antreibt (Giacomo et al. 2010), woraus sich Vorteile wie geringe Reibung, bessere Akustik und Gewichtseinsparungen bei gleicher Motorlebensdauer und Zuverlässigkeit ergeben sollen.

Bei Pkw-Motorabdichtungen entstehen Verluste durch die Reibung zwischen feststehenden, am Gehäuse befestigten Dichtungsteilen und rotierenden Teilen. Beispiele hierfür sind Kurbelwelle vorne und hinten, Nockenwellen, Nebenantriebe und Anbauaggregate. Aktuell wird an neuartigen Dichtsystemen geforscht,

um die bisher weit verbreiteten PTFE-Dichtlippen auf neuartige, reibungsarme Dichtsysteme umzustellen. Insbesondere bei Nutzfahrzeugen ist hier ein großes Einsparpotential hinsichtlich Reibungsreduzierung und Gewichtersparnis erkennbar (Reichert et al. 2010).

#### 3.1.1.4 Motorkonstruktion

Im Vordergrund der Motorkonstruktion stehen die thermodynamische und mechanische Optimierung des Motors. Einige wesentliche Herausforderungen bei der Konstruktion von Motoren sind:

- Geringes Bauteilgewicht und hohe Steifigkeit von Zylinderblock, Zylinderkopf und Kurbelgehäuse (Korte et al. 2008).
- Kostengünstige Motorenfamilien: Ein Großteil der Komponenten muss in verschiedenen Motoren gleich verbaut werden können, um die Fertigung so wirtschaftlich wie möglich zu gestalten (Mastrangelo et al. 2011).
- Sicherstellung geringen Zylinderverzugs bei unterschiedlichen thermischen Belastungen zur Reibungsminimierung (Korte et al. 2008).
- optimierter Wärmehaushalt und optimierte Kühlung (Korte et al. 2008).
- Beim Einlasssystem sind geringes Gewicht, große Kompaktheit, niedrige Strömungsverluste und gutes Ansprechverhalten Auslegungsziele. Daher geht der Trend zur Systemintegration von Luftfiltration, Luftmengenmessung, Ladeluftkühler, Drosselklappen und Luftverteiler (Korte et al. 2008).
- Optimierte Brennraumauslegung (Korte et al. 2011b) und optimiertes Zylindervolumen zur Minimierung von Wandwärmeverlusten (Mastrangelo et al. 2011).

Für eine möglichst effiziente Absenkung der inneren Reibung wird in die Reduktion des Hubraums bei Downsizing-Konzepten auch die Verringerung der Zylinderzahl einbezogen (Roß et al. 2010). Die Konstruktion von kleinvolumigen Motoren mit hoher spezifischer Leistung ist im Vergleich zu Aggregaten mit größerem (Zylinder)hubraum grundsätzlich anspruchsvoller (Weinowski et al. 2009). Wird die Zylinderzahl reduziert, kann das zu einem Anstieg des Zylinderhubraums führen, wobei ein relativ großes Volumen der einzelnen Zylinder den thermodynamischen Wirkungsgrad verbessert (Mastrangelo et al. 2011). Ein weiterer zu berücksichtigender Parameter bei der Festlegung der bestmöglichen Zylinderabmessungen ist die HC-Emission. Hier haben große Einzelzylinderhubvolumina eindeutig Vorteile (Weinowski et al. 2009). Im Vergleich von Zwei- und Dreizylinderkonzepten erweist sich die Zweizylinderkonfiguration aufgrund des günstigen Zylinderhubraums als diejenige mit dem besten thermodynamischen Wirkungsgrad (Mastrangelo et al. 2011). Die Zweizylinderarchitektur bietet zudem Vorteile in Bezug auf die Blocklänge und das Gewicht; durch die geringere Motorenlänge eignet sich ein Zweizylindermotor besser zur Hybridisierung. Die geringere Reibung durch die reduzierte Anzahl an Zylindern und Lagerstellen im Kurbeltrieb wird jedoch kompensiert, weil aufgrund der größeren Zylinderbohrung beim Zweizylindermotor zunehmende Gas- und Massenkräften größere Lagerdurchmesser nötig machen und weil die größeren Massen der Ventile entsprechend härtere Ventildfedern erfordern (Weinowski et al. 2009). Das NVH-Verhalten einer Zweizylinderkonfiguration erfordert den Einsatz eines Ausgleichssystems für die freien Kräfte erster Ordnung, wodurch der konstruktive Aufwand bei dieser Zylinderanordnung steigt (Mastrangelo et al. 2011).

Mit steigender Effizienz moderner Verbrennungsmotoren wachsen auch die Anforderungen an die Motorlager. Die tendenziell sinkende Ölviskosität sowie ein steigendes Maß an Ölverdünnung durch Kraftstoffe wie E85 sind nur einige weitere Punkte auf einer zunehmend langen Liste harter Betriebsbedingungen für Kurbelwellenlager (Adam et al. 2010). Gleitlager für den Einsatz im Motor müssen daher für immer höhere

spezifische Belastungen ausgelegt werden. Dazu zählen höhere Zünddrücke, höhere Temperaturen, kleinere Lagerabmessungen und eine stärkere Kurbelwellendurchbiegung, die durch Leichtbaumaßnahmen verursacht wird (Adam et al. 2010).

### 3.1.1.5 Elektrifizierung von Nebenaggregaten

In konventionellen Fahrzeugen stellt ausschließlich der Verbrennungsmotor die Antriebs- und Hilfsenergie zur Verfügung. Durch den mechanischen Antrieb von Nebenaggregaten wie Klimakompressor, Lichtmaschine und Lenkhilfpumpe und die Kopplung von Verbrennungsmotor und Antriebsrädern über das Getriebe ist sowohl hinsichtlich der Drehzahlen als auch der Drehmomente eine hohe Dynamik erforderlich. Die verschiedenen Betriebszustände erfordern Kompromisse in der Auslegung des Gesamtsystems Verbrennungsmotor, von denen auch Ansaugtrakt, Abgasnachbehandlungssysteme, Kühlsystem und Nebenaggregate betroffen sind. Die Komplexität eines modernen Verbrennungsmotors und seiner Nebenaggregate ist eine direkte Folge des großen Betriebsbereichs. Beispiele hierfür sind:

- Ventiltrieb, Motorsteuerung und Kraftstoffeinspritzung: optimaler Motorbetrieb in verschiedenen Betriebspunkten erfordert hohen Aufwand für variable Ventilsteuerzeiten und Mehrfacheinspritzung.
- Kühlmittel- und Ölpumpe: Antriebsleistung und damit auch die Fördermenge sind abhängig von der Motordrehzahl.
- Ansaugtrakt: zusätzlicher Aufwand für schaltbare Ansaugrohre resultiert aus unterschiedlichem Schwingungsverhalten der Luftsäule bei Veränderung des Luftmassenstroms.
- Abgasnachbehandlung und Abgasturbolader: Je nach Motorbetriebspunkt unterscheiden sich Abgaszusammensetzung, Druck und Massenstrom.
- Mechanisch gekoppelte Nebenaggregate (Lichtmaschine, Lenkhilfpumpe, Klimakompressor) sind so ausgelegt, dass sie bei jeder Drehzahl die notwendige Leistung bereitstellen können.

In zukünftigen Motorkonzepten ist von einer Zunahme der Elektrifizierung der Nebenaggregate auszugehen (Korte et al. 2008; VDE 2010). Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der elektrische Antrieb für Wasserpumpen (Korte et al. 2008). Weniger bekannt sind neuartige Lösungen wie z. B. die elektronische Ansteuerung des Wastegates beim Abgasturbolader. Der wesentliche Vorteil der Elektrifizierung ist die Entkopplung von Nebenaggregaten und Verbrennungsmotor. Die Auslegung der elektrifizierten Nebenaggregate kann auf einen oder wenige Betriebspunkte erfolgen. Weiterhin ergeben sich neue Freiheitsgrade beim Betrieb der Nebenaggregate, z. B. das Laden der Starterbatterie während Bremsvorgängen durch Erhöhung der Lichtmaschinenleistung.

## 3.1.2 Verbrennungsmotor in parallelen Hybridfahrzeugen

Haupttreiber für die Einführung von parallelen Hybridantrieben ist die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen (Junker 2011). Die Anforderungen an den Verbrennungsmotor in Fahrzeugen mit parallelem Hybridantrieb unterscheiden sich wenig von denen im konventionellen Fahrzeug. Durch die grundsätzlich bestehende mechanische Kopplung von Verbrennungsmotor und Rad deckt der Motor wie beim konventionellen Fahrzeug den gesamten Drehzahl- und Lastbereich einschließlich des transienten Betriebs ab (Sorger et al. 2011). Der Entwicklungsfokus liegt hier im Downsizing-Ansatz, um den Betriebsbereich des Verbrennungsmotors in höhere Lastbereiche mit besserem Wirkungsgrad zu verschieben. Der Reibungsreduktion kommt ebenfalls eine wichtige Rolle zu.

Bei Micro-, Mild- und Vollhybriden ist der Verbrennungsmotor Hauptantrieb und Energiequelle für die elektrischen Verbraucher des Fahrzeugs. Durch die Momentenaddition von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine lässt sich die Leistung des Verbrennungsmotors ohne Einbußen beim Beschleunigungs- und Steigvermögen reduzieren (Fischer 2009). Je nach Leistung der elektrischen Maschine(n) können mit geeigneten Betriebsstrategien Lastspitzen vom Elektromotor gedeckt werden. Hinsichtlich der erforderlichen Dynamik ergeben sich aber nur geringe Veränderungen gegenüber dem Einsatz im konventionellen Antrieb. Die Start-Stopp-Funktion erfordert den Einsatz von angepassten Startsystemen sowie die Sicherstellung der Schmierung während des Anlassvorgangs.

Vollhybridfahrzeuge erlauben zusätzlich zum kombinierten Betrieb von Verbrennungsmotor und elektrischer Maschine auch den rein elektrischen Betrieb für begrenzte Streckenabschnitte (Junker 2011). Durch den vergleichsweise großen Leistungsanteil des Elektromotors kann der Verbrennungsmotor bei gleicher Antriebsleistung am Rad kleiner dimensioniert werden. Zusätzlich kann auch ein Teil der dynamischen Anforderungen durch den Elektromotor gedeckt werden. Wird zum Anfahren ausschließlich der Elektromotor verwendet und der Verbrennungsmotor konsequent abgeschaltet, dann lässt sich auch die Komplexität der Abgasnachbehandlung reduzieren, da Startvorgang und Leerlauf-Betrieb nicht abgedeckt werden müssen.

Durch Vergrößerung der Batteriekapazität beim Vollhybrid in Kombination mit einer externen Lademöglichkeit entsteht ein so genannter paralleler Plug-In-Hybrid mit vergrößertem rein elektrischem Aktionsradius (Junker 2011). Typischerweise verfügen diese Fahrzeuge über die Möglichkeit, auch längere Streckenabschnitte zum Beispiel im Innenstadtbereich rein elektrisch zurückzulegen, während bei Überland- und Autobahnfahrten die Betriebsweise der eines parallelen Hybridantriebs entspricht. Der Verbrennungsmotor in solchen Plug-In Hybriden erfüllt die gleichen Aufgaben wie beim parallelen Vollhybriden ohne Lademöglichkeit, so dass hier grundsätzlich identische Motorkonzepte verwendet werden können.

Die Bandbreite der Anforderungen an den Verbrennungsmotor ist beim parallelen Hybridantrieb am größten. Beim Micro- und Mild-Hybriden unterscheidet sich die Betriebsweise nur geringfügig von der in konventionellen Fahrzeugen. Beim Vollhybrid kann der Motor kleiner dimensioniert werden, da das Anfahren und Leistungsspitzen durch den Elektromotor gedeckt werden. In allen parallelen Hybridkonzepten ist eine hohe Dynamik im Betrieb des Verbrennungsmotors erforderlich, die aus der mechanischen Kopplung von Verbrennungsmotor und Rad resultiert.

### 3.1.3 Verbrennungsmotor in seriellen Hybridfahrzeugen

In seriellen Hybridantrieben erfolgt der Antrieb der Räder ausschließlich elektrisch. Der Verbrennungsmotor wird als Stromerzeuger eingesetzt und dient lediglich dem Antrieb eines Generators (Sorgner et al. 2011). Während bei Verbrennungsmotor-elektrischen Antrieben der Verbrennungsmotor stets die aktuell am Rad erforderliche Antriebsleistung zur Verfügung stellen muss, haben serielle Hybridantriebe einen zusätzlichen Freiheitsgrad im Betrieb des Systems. Dieser resultiert aus der Verwendung eines Energiespeichers, wodurch die erforderliche Leistung flexibel zwischen Energiespeicher und Verbrennungsmotor aufgeteilt werden kann. Durch die Entkopplung von Rad und Verbrennungsmotor kann dieser wirkungsgradoptimiert betrieben werden indem der Betriebsbereich auf bevorzugte Leistungs- und Drehzahlbereiche mit hohem Wirkungsgrad und/oder geringen Emissionen beschränkt wird (Sorgner et al. 2011). Weiterhin können instationäre Betriebszustände und Leerlauf-Betrieb vermieden werden. Die Menge der zulässigen Betriebszustände ist damit nicht nur kleiner als bei konventionellen Fahrzeugen, sie ist darüber hinaus auch a priori bekannt und ermöglicht Vereinfachungen im Aufbau des Verbrennungsmotors oder den Einsatz von unkonventionellen Motorkonzepten (Freikolbenlineargenerator, Wankelmotor) bzw. von alternativen Energiewandlern wie Brennstoffzellen.



Großen Einfluss auf die Komplexität des Verbrennungsmotors und seiner Hilfsaggregate hat im seriellen Hybrid die Betriebsstrategie des Fahrzeugs. Diese kann den dynamischen Betrieb des Verbrennungsmotors vorsehen, bei dem der Motor direkt der aktuellen Leistungsanforderung am Rad folgt. Alternativ kann eine Phlegmatisierung des Motorbetriebs vorgesehen werden, hier folgt die Leistung des Verbrennungsmotors dem mittleren Leistungsbedarf des Fahrzeugs. Weiterhin besteht beim seriellen Hybrid die Möglichkeit, den Verbrennungsmotor ausschließlich stationär in diskreten Betriebspunkten zu betreiben. Dieser sogenannte Einpunktbetrieb bietet aus Sicht des Verbrennungsmotors großes Optimierungspotential hinsichtlich Wirkungsgrad und Emissionen (Fischer 2009).

Bei kompromissloser Auslegung auf den Einpunktbetrieb können Vorteile in der Komplexität, Konstruktion und Herstellung von Verbrennungsmotoren entstehen, durch die neue kosten- und gewichtsoptimierte Motorkonzepte möglich sind (Sorger et al. 2011). Das Gesamtsystem vereinfacht sich, weil instationäre Betriebszustände und Überlasten wegfallen. Wird der Motor darüber hinaus beim Anlassen durch den Generator bis zu seiner Betriebsdrehzahl geschleppt und erst dann Kraftstoff eingespritzt, kann auch die Abgasnachbehandlung ausschließlich auf den Betriebspunkt ausgelegt und deshalb vereinfacht werden (Fischer 2009). Weitere Vereinfachungen ergeben sich auch beim Kühlsystem, das auf einen definierten Lastpunkt ausgelegt werden kann und bei der Lagerung der Kurbelwelle. Da die Drehzahl bekannt ist, können die Lager der Kurbelwelle reibungsoptimiert werden oder alternativ Wälzlager eingesetzt werden, deren Einsatz den Verzicht auf Ölpumpe und Druckölleitungen im Kurbelgehäuse ermöglichen. Hieraus resultieren wiederum Vereinfachungen im Herstellungsprozess des Kurbelgehäuses. Wird die Kurbelwelle beispielsweise nur außen gelagert, dann kann das Kurbelgehäuse vertikal geteilt werden, wodurch Herstellung und Zusammenbau vereinfacht werden. Neben Abgasnachbehandlung und Kühlsystem kann auch der Ventiltrieb und der Ansaugtrakt auf den Einpunktbetrieb abgestimmt werden. Aufwändige Konstruktionen wie variable Ventiltriebe und schaltbare Ansaugrohre erübrigen sich und die Komplexität des Verbrennungsmotors verringert sich. Für die Steuerzeiten von Ein- und Auslassventilen können große Überschneidungen realisiert werden, weil der Motor nicht im Leerlauf betrieben wird. Ansaug- und Auslassgeometrien und Resonanzvolumina werden ebenfalls auf den Betriebspunkt optimiert, wodurch sich neben der Effizienz auch das akustische Verhalten verbessern lässt. Bei Betrachtung des Gesamtsystemwirkungsgrads des Antriebs verlieren die Vorteile des Einpunktbetriebs jedoch an Gewicht, da die notwendige Speicherung überschüssiger Energie zusätzliche Verluste erzeugt, die bei dynamischem Einsatz des Verbrennungsmotors und direkter Nutzung der bereitgestellten Energie zum Antrieb des Fahrzeugs nicht anfallen. Insgesamt ist daher die Effizienz des seriellen Hybridantriebs geringer als die paralleler Hybridantriebe.

### 3.1.4 Verbrennungsmotoren als Range-extender in elektrischen Fahrzeugen

Die Reichweite von Batteriefahrzeugen ist aufgrund der hohen Kosten und Massen aktuell verfügbarer Batterietechnologien limitiert. Typischerweise wird die Batterie auf die täglich zu erwartenden Fahrstrecke im Stadtverkehr ausgelegt. Eine Möglichkeit, die Reichweite zu erhöhen, ist die Integration einer zweiten Energiequelle im Fahrzeug, beispielsweise eines mechanisch gekoppelten Verbrennungsmotors oder eines Verbrennungsmotors mit Generator. Dieses zusätzliche Aggregat wird als Range-extender (Reichweitenverlängerer) bezeichnet.

Als eher selten verwendete Zusatzausrüstung eines Batteriefahrzeugs ist eine kompakte Einheit mit geringem Gewicht anzustreben. Typischerweise erfolgt die Steuerung eines Range-extenders automatisch durch die Betriebsstrategie des Fahrzeugs, die den Range-extender aktiviert, wenn ein definierter Ladezustand unterschritten wird oder wenn große Leistungsanforderungen seinen Betrieb erfordern. Deshalb sollte der Startvorgang und der Betrieb des Range-extenders durch den Fahrer nicht wahrgenommen werden. Die Anforderungen an den als Range-extender verwendeten Verbrennungsmotor unterscheiden sich von denen an Verbrennungsmotoren in konventionellen und Hybridfahrzeugen. Da es

sich um ein (optionales) Zusatzaggregat zum bestehenden elektrischen Antriebssystem handelt, das automatisiert und vom Fahrer möglichst unbemerkt betrieben werden soll, müssen folgende wesentliche Anforderungen erfüllt werden (Fischer 2009; Genender et al. 2011):

- kompaktes Aggregat, geringes Gewicht, geringe Kosten
- guter Wirkungsgrad und geringe Emissionen
- Startvorgang und Betrieb durch den Fahrer nicht wahrnehmbar
- geringe Schallemissionen, gutes Schwingungsverhalten

Aktuell werden zwei verschiedene Konzepte für die Einbindung des Range-extenders in die Antriebsstruktur des batterie-elektrischen Fahrzeugs verfolgt (Fischer 2009). Zum einen die mechanische Kopplung des Verbrennungsmotors an die Räder, zum anderen die Verwendung des Range-extenders als Stromerzeuger.

Die Struktur von Range-extendern Fahrzeugen mit mechanisch gekoppeltem Verbrennungsmotor ist identisch mit der von parallelen Plug-In Hybridantrieben. Ausgehend vom batterie-elektrischen Fahrzeug wird zusätzlich ein Verbrennungsmotor zur Vergrößerung der Reichweite eingesetzt, der zur Steigerung des Gesamtsystemwirkungsgrads mechanisch mit den Rädern gekoppelt ist. Der Übergang vom Plug-In Hybrid zum Range-extendern Fahrzeugen mit parallelem Hybridantrieb ist fließend, obwohl beide unter verschiedenen Gesichtspunkten entwickelt werden (Genender et al. 2011). In Range-extendern Fahrzeugen wird der Verbrennungsmotor jedoch kleiner dimensioniert und seltener eingesetzt, da die üblicherweise auftretenden Entfernungen mit Hilfe der Batterie zurückgelegt werden (Fischer 2009).

Erfüllt der Range-extendern lediglich die Funktion eines Stromerzeugers, dann entspricht die Antriebsstruktur der eines seriellen Hybridfahrzeugs (Genender et al. 2011). Die elektrische Energie wird entweder in den Energiespeichern gespeichert oder direkt in den Fahrmotoren verwendet. Der Range-extendern kommt auch hier nur dann zum Einsatz, wenn der Energiebedarf der zurückzulegenden Strecke nicht alleine durch die Batterie gedeckt werden kann (Fischer 2009). Im seriellen Range-extendern ist der Verbrennungsmotor vom Rad entkoppelt, da kein mechanischer Durchtrieb existiert. Die möglichen Betriebsmodi des Range-extendern (dynamischer oder stationärer Betrieb) sind identisch mit denen serieller Hybride. Für den Einsatz als Stromerzeuger werden hochintegrative Systeme mit gemeinsamem Gehäuse für Verbrennungsmotor und Generator favorisiert (WM-BW 2010).

Ob sich eines der beiden Konzepte in Zukunft durchsetzen wird, kann zum heutigen Stand nicht abschließend beurteilt werden. Der Vorteil der parallelen Anordnung ist die größere Effizienz aufgrund der geringeren Verluste in der Übertragungskette vom Motor zum Rad. Nachteilig ist jedoch, dass dieses System mechanisch mit dem Antriebsstrang verbunden sein muss, was sich negativ auf das Packaging auswirkt. Dagegen kann der Stromerzeuger als kompakte Einheit ausgeführt werden, die lediglich über eine elektrische Schnittstelle mit dem Fahrzeug verbunden wird. Als optionales Zusatzsystem zum bestehenden Batteriefahrzeug ist diese Form des Range-extendern daher besser geeignet, denkbar ist auch der Einsatz ins Fahrzeug lediglich dann, wenn tatsächlich ein erhöhter Reichweitenbedarf vorliegt. Nachteil dieser Variante ist aber der geringere Wirkungsgrad.



### 3.1.5 Alternative Verbrennungsmotorkonzepte

Neben den klassischen Hubkolbenmotoren sind neue Motorkonzepte insbesondere für den Einsatz in seriellen Hybridfahrzeugen und Range-extender Fahrzeugen mit serieller Anordnung in der Diskussion.

Eine viel versprechende Alternative ist der Freikolbenlineargenerator, der sich zur Zeit in der Entwicklung befindet. Dieses Motorkonzept wandelt die oszillierende Bewegung des Kolbens über einen Lineargenerator direkt in elektrische Energie. Die in konventionellen Hubkolbenmotoren stattfindende Umwandlung in eine rotatorische Bewegung entfällt bei diesem Konzept, wodurch die hierfür benötigten Bauteile wie Kurbelwelle, Kurbelwellenlagerung und Pleuel nicht benötigt werden. Die Hauptvorteile des Konzepts sind variabler Hubraum und variable Verdichtung. Vor allem im Teillastbereich reduzieren sich aufgrund des hier eingestellten geringeren Hubs die Reibungsverluste, woraus eine Steigerung des Wirkungsgrads in diesem Betriebsbereich resultiert. Der Freikolbenlineargenerator ist durch seine kompakte Bauform insbesondere als dynamisch betriebener Stromerzeuger im seriellen Hybridfahrzeug oder als dynamisch betriebener Range-extender für Batteriefahrzeuge geeignet.

Aufgrund der veränderten Anforderungen an den Einsatz des Verbrennungsmotors im seriellen Range-extender Fahrzeug rückt auch der Wankelmotor, der in konventionellen Fahrzeugen nahezu verschwunden ist, wieder in den Fokus (WM-BW 2010; Genender et al. 2011). Aus der Anwendung im konventionellen Antrieb sind verschiedene Nachteile des Wankelmotors gegenüber konventionellen Hubkolbenmotoren (HKM) bekannt. Dies sind:

- größere Druckverluste durch längere Dichtflächen im Verbrennungsraum,
- höherer spezifischer Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum HKM bei dynamischem Einsatz,
- größere Wärmeverluste aufgrund des ungünstigeren Verhältnisses von Oberfläche zu Brennraumvolumen,
- unvollständige Verbrennung des Gemischanteils im Brennraumbereich oberhalb der Zündkerze sowie
- vergleichsweise hohe Kohlenwasserstoffanteile im Abgas

Die genannten Nachteile können bei modernen Wankelmotoren vermieden oder zumindest gemindert werden (Genender et al. 2011). Die größeren Druckverluste lassen sich durch den Einsatz neuer Materialien im Bereich der Dichtflächen vermindern. Der höhere spezifische Kraftstoffverbrauch kann durch kompromisslose Auslegung auf den Einpunktbetrieb, beispielsweise durch optimierte Steuerzeiten, Einlass- und Auslassgeometrien reduziert werden. Die größeren Wandwärmeverluste sind in der Theorie ein Problem. Da ein Viertakt-Hubkolbenmotor aber einen Leerhub durchführt, muss das Brennraumvolumen doppelt so groß wie beim Wankelmotor sein, um das gleiche Verdrängungsvolumen zu erhalten. Die effektive Brennraumoberfläche des HKM verdoppelt sich dadurch, im Ergebnis sind die Wandwärmeverluste des Wankelmotors geringer als beim HKM. Die unvollständige Verbrennung und der Ausstoß von Kohlenwasserstoffen lassen sich durch Schichtladung vermeiden, mit der im ungünstigen Bereich des Brennraums kein zündfähiges Gemisch vorhanden ist. Außerdem erfolgt der Ausstoß des unverbrannten Restgases nur bei Motoren mit Umfangsauslass und tritt bei Motoren mit Seitenauslass nicht auf. Alternativ können die Kohlenwasserstoffe im Abgas durch eine veränderte Auslegung des Abgaskatalysators reduziert werden.

Wankelmotoren weisen gegenüber konventionellen HKM verschiedene Vorteile auf, die insbesondere beim Einsatz als Range-extender im Einpunktbetrieb zum Tragen kommen (Fischer 2009). Prinzipbedingt entfallen beim Wankelmotor Ventile und Ventiltrieb (Nockenwelle, Stößel, Ventilspielausgleich und Kipphebel). Der Aufbau ist dadurch weniger komplex als beim HKM, die Ausfallsicherheit größer und der

Platzbedarf geringer. Aufgrund der größeren spezifischen Leistung ist die Masse eines Wankelmotors geringer als die eines Viertakt-Hubkolbenmotors mit gleicher Leistung. Da nur rotierende und keine oszillierenden Massen vorhanden sind, ist ein Ausgleich der Massenkräfte möglich. Die Drehzahlen von Wankelmotoren sind bei gleicher Leistung größer als beim HKM, wodurch ein kleinerer Generator die gleiche elektrische Leistung erzeugen kann und eine hohe Integration des Generators ermöglicht wird. Sollen verschiedene Leistungen dargestellt werden, so können aufbauend auf einem Grundmotor Varianten erstellt werden, indem die Breite des Läufers und des Gehäuses verändert wird.

### 3.1.6 Entwicklungspotential für Verbrennungsmotoren

Als übergeordneter Forschungsbedarf für Verbrennungsmotoren konnten folgenden Themen identifiziert werden:

- Kostensenkungen durch skalierbare Motorenfamilien
- Effizienzsteigerung des Verbrennungsprozesses und Reduzierung mechanischer Verlustleistungen (Hohenthal 2009).
- Optimaler Betrieb hinsichtlich Leistung und Emissionen des Motors im gesamten Kennfeld: (Hohenthal 2009). Hierzu ist die detaillierte Abstimmung des Motors und seiner Betriebsstrategie auf die im realen Fahrbetrieb vorherrschenden Betriebspunkte mit Hilfe der Simulation weiter zu entwickeln, die das Bindeglied zwischen Fahrzeugbewegung (v-Profil, Getriebe, Einsatzhäufigkeit, Betriebsstrategie) und Betriebscharakteristika des Verbrennungsmotors darstellt. Sie ermöglicht die breitgefächerte Untersuchung einer Vielzahl von einzelnen konstruktiven Parametern und damit eine gezielte Kombination von Optimierungsmaßnahmen.
- Weiterentwicklung von Werkstoffen und Konstruktionen zur Reduktion der wirksamen Triebwerksreibung. Hierzu zählen neben der konstruktiven Auslegung des Motorblocks auch Optimierungsmaßnahmen an Nebenaggregaten (Öl- und Kühlmittelpumpe) und deren Antrieb sowie am Ventiltrieb und den Lagerstellen von Nockenwellen und Kurbelwelle
- Neben den klassischen Hubkolbenmotoren sind insbesondere für den Einsatz als Range-extender auch andere Konzepte wie Wankel- oder Freikolbenmotoren hinsichtlich ihrer Eignung zu untersuchen. Diese Konzepte weisen zwar Nachteile beim Einsatz in konventionellen Fahrzeugen auf, können aber durch ihre spezifischen Eigenschaften hinsichtlich Packaging, Variabilität, Akustik etc. in alternativen Fahrzeugkonzepten Vorteile bieten.
- Im Rahmen der für diese Studie durchgeführten Workshops sind folgende Aussagen zu Forschungsbedarfen aufzuführen bzw: Maßnahmen für Problemfelder adressiert:
  - Downsizing und Downspeeding führen zur Vibrationserhöhung aufgrund unausgeglichener Massenträgheitsmomente
  - HCCI – Höhere Verbrennungsdrücke führen zu höheren Vibrationsamplituden
  - Zylinderabschaltung – ungleichmäßige Drehmomentverteilung führt zu Antriebsstrangvibrationen
  - Direkteinspritzung – Injektorbedingte Einspritzgeräusche in Kombination mit hohen Einspritzdrücken

- Variable Ventilverstellung – Veränderung der Frequenzanregung
- Start-Stopp-Funktion – steigende Bedeutung des Motorstarts für Batterie, Motorlager, Kupplung und Anlasser sowie fehlende Maskierung von Nebengeräuschen bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor
- Zunehmende Komplexität der Antriebsstränge, Entwicklung geeigneter Betriebsstrategien hinsichtlich Energieeffizienz, Komfort, Betriebsfestigkeit notwendig
- Frontloading im Entwicklungsprozess wird aufgrund der steigenden Komplexität wichtiger.

Im Folgenden wird ein Überblick über verschiedene effizienzsteigernde Maßnahmen am Verbrennungsmotor gegeben, wobei der Fokus auf Downsizing, Aufladung, Reibungsminderung und konstruktive Aspekte gelegt wird. Anschließend werden die spezifischen Anforderungen, die sich aus den unterschiedlichen Antriebskonzepten Parallel-Hybrid, serieller Hybrid und batterieelektrisches Fahrzeug mit Range-extender für die eingesetzten Verbrennungsmotoren ergeben, dargestellt. Abschließend wird der existierende Forschungsbedarf hinsichtlich der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren abgeleitet.

## 3.2 Getriebe

Das Getriebe ist heute eine unabdingbare Komponente des Antriebs. In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor beinhaltet es die Kupplung, die Synchronisierungselemente und die eigentlichen Getriebestufen, i. a. mehrere Zahnradgetriebe. Die Hauptaufgabe des Getriebes liegt in der Drehmoment-/ Drehzahlwandlung zur Anpassung der Motorkennlinie an die Fahrwiderstände, zum Befahren von Steigungen und zum Beschleunigen des Fahrzeugs. Das integrierte Anfahelement, die Kupplung, dient der Realisierung eines Schlupfbetriebes, sodass bei laufendem Verbrennungsmotor das Anfahren möglich ist. Der Verbrennungsmotor kann unterhalb seiner Leerlaufdrehzahl nicht nennenswert belastet werden. Eine weitere Aufgabe des Getriebes ist die Drehrichtungsumkehr zum Rückwärtsfahren. Dafür benötigt man eine weitere Welle und ein Zahnradpaar, die auch Bauraum beanspruchen. Das besonders kleine zusätzliche Zahnrad führt zu einer großen Übersetzung des Rückwärtsganges, die größer als die des ersten Ganges sein kann. Aufgrund des Arbeitsprinzips des Verbrennungsmotors erzeugt er ein ungleichmäßiges Drehmoment; die dadurch verursachte Drehschwingungsanregung muss durch die Getriebeeinheit gefiltert bzw. geglättet werden. Dazu dient hauptsächlich die Masse des Schwungrades, die wie ein Tiefpassfilter wirkt, aber auch in das Schwungrad integrierte Schwingungsglieder. Handschaltgetriebe besitzen i. a. stirnverzahnte Räder, Automatikgetriebe mehrere Umlaufgetriebe. Kombinationen aus beiden sind gängig. Der bei Umlaufgetrieben aufgrund der abrollenden Bewegung prinzipiell höhere Wirkungsgrad wird durch die Hilfsaggregate wie Pumpen und elektrischen Steuerungen wieder aufgehoben. Doppelkupplungsgetriebe wählen automatisiert in einem zweiten Teilgetriebe den nächsten Gang bereits vor, sodass eine zweite Kupplung nahezu unterbrechungsfrei das nächste Zahnradpaar in Eingriff setzt. Dafür werden Handschaltgetriebe mit elektrischen oder hydraulischen Stellgliedern automatisiert. Schubketten auf Kegelrädern werden vereinzelt in stufenlosen Getrieben eingesetzt. Für den Gesamtwirkungsgrad ist die Schaltbetriebsweise ausschlaggebend.

Die Verbreitung von Handschaltgetrieben (MT) und Automatikgetrieben (AT) ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Während in Japan und in den USA ca. 80 bis 90% der Fahrzeuge ein Automatikgetriebe haben, wurden in Europa ca. 80% mit einem Handschaltgetriebe gebaut. Es gibt einen unübersehbaren Trend in Deutschland im Übergang zu automatischen oder automatisierten Getrieben. Hatten manuelle Getriebe noch bis zum Ende des Jahres 2000 einen Marktanteil von 85%, so sind heute hierzulande schon 28% der zugelassenen Pkw mit automatischen Getrieben unterwegs. Die Tendenz ist steigend, jedes Jahr kommt ein Prozentpunkt hinzu. In Westeuropa nimmt der Anteil von Pkw mit automatischer Gangwahl ebenso zu. Vor

allem der Marktanteil von Doppelkupplungsgetrieben steigt. Das Marktforschungsinstitut Global Insight errechnet einen weltweiten Marktanteil von 3% bis 2012.

In zukünftigen Fahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb bekommt das Getriebe eine andere Bedeutung. Elektromotoren erzeugen im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ihr maximales Drehmoment bereits im Stillstand. Die Hauptfunktion des Getriebes, die Drehmoment-/Drehzahlwandlung, bleibt erhalten, wobei sich herausstellen wird, ob zukünftige Getriebe einstufig, mehrstufig oder stufenlos ausgeführt wird. Eine relativ einfache einstufige stirnverzahnte Getriebestufe erlaubt es, den Elektromotor kleiner zu bauen. Der Elektromotor selbst ist für höhere Drehzahlen als ein Verbrennungsmotor geeignet, zudem lässt sich die Drehrichtung umkehren. Einige Aufgaben des heutigen Getriebes werden daher wegfallen, wie die Realisierung des Schlupfbetriebs, die Richtungsumkehr und die Filterung der Drehschwingungen. Die Ausführung wird ausschließlich als Automatikgetriebe geschehen.

Eine Auswirkung der elektrischen Antriebstechnik käme für die Getriebeindustrie besonders stark zum Tragen, wenn Fahrzeuge mit Radnabenmotoren in den Vordergrund rücken. In diesem Fall könnte man auf ein Getriebe verzichten.

Die anteiligen Fertigungsschritte, im Wesentlichen das Urformen und die spanende Bearbeitung an den Bauteilen des Getriebes, bleiben beim Elektrofahrzeug ähnlich zu denen des konventionellen Getriebes. Ein wesentlicher Unterschied besteht im Systemanteil des Getriebes im Gesamtfahrzeug; dieser wird durch die steigende Elektrifizierung deutlich sinken bis hin zum gänzlichen Verschwinden des Systems „Getriebe“.

Im Workshop wurde als Entwicklungspotential die Weiterentwicklung von elektronischen Differential- wie Getriebefunktionen genannt, auch unter der Bezeichnung Torque-Vectoring bekannt. Bei Einzelradantrieben wird die Funktionalität dann in der elektronischen Ansteuerung verankert und damit also Thema im Abschnitt Leistungselektronik sein. Beim Zentralantrieb kann Torque-Vectoring aber auch wie bei heutigen Differentialen durch zusätzliche kleine elektrische Hilfsantriebe dargestellt werden. Ebenso wurde im Workshop die Integration des Getriebes in den Elektromotor herausgestellt. Im Gegensatz zum heutigen „angebauten“ Getriebe inkl. Kupplung wird das relativ einfache Getriebe von Elektrofahrzeugen vorteilhafterweise im Elektromotor integriert sein. Ähnliches gilt für die Integration von Getrieben in Hybridantriebe. Hier ist eine Unterscheidung von Integration des Getriebes in den Motor und Integration des oder der Motoren in das Getriebegehäuse nicht eindeutig.

Eine starke Verknüpfung von Getriebebau-Kompetenz und Elektromaschinenbau-Kompetenz stellt das Fachkräfte- bzw. Ausbildungspotential für die Zukunft dar. Es darf nicht unberücksichtigt bleiben, dass der Elektromaschinenbau stark mit der Leistungselektronik zusammenhängt. Durch diese Kombination der Kompetenzen sind die fachübergreifenden Problemstellungen wie Geräuschentwicklung und elektromagnetische Verträglichkeit in den richtigen Kontext zu bringen. Zusammenfassend kann man hier auf die Stärkung des Berufsbildes des Mechatronikers verweisen.

## 3.3 Elektromotor

### 3.3.1 Arten von Elektromotoren

Zur vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Arten von Elektromotoren wird im Folgenden zuerst kurz auf die allgemeine Funktionsweise elektrischer Maschinen eingegangen. Dies soll zum einen dazu beitragen die Namensgebung nachvollziehbar zu gestalten und zum anderen mögliche neuartige Konzepte richtig einzugliedern. Im Kapitel 3.3.5, indem auf das Entwicklungspotential eingegangen wird, wird dann wieder darauf zurückgegriffen.

Grundsätzlich gilt für das Verständnis der Funktionsweise und für den Aufbau von Elektromotoren das bekannte Prinzip, nachdem auf stromdurchflossene elektrische Leiter eine Kraft wirkt, wenn sie sich in einem Magnetfeld befinden. Das Magnetfeld kann dabei durch Permanentmagnete oder auch durch elektrische Ströme erzeugt werden. Man unterscheidet für die Kraft- bzw. Drehmomententstehung auch deshalb unter felderzeugenden (felderregenden) und drehmomenterzeugenden Strömen. Der magnetische Fluss wird am besten durch Eisen geleitet, weil es ihm den geringsten Widerstand entgegenstellt (fast gegen Null). Hingegen benötigt man zum Magnetisieren von Luft – und hier speziell dem Luftspalt zwischen dem drehenden und dem feststehenden Maschinenteil – aufgrund des schlechteren magnetischen Leitwertes von Luft fast den gesamten Felderzeugungs-Materialeinsatz. Die Höhe des Magnetfeldes ist außerdem durch die Sättigungscharakteristik des Eisens begrenzt. Die Höhe des Stromes ist durch die thermische Ableitung der Verlustwärme eingeschränkt. Die Größe des Drehmomentes ist also direkt vom Materialeinsatz des Eisens und Kupfers abhängig und damit kostenbestimmend, nicht die Leistung. Da der Strom i. a. durch eine Leistungselektronik zugestellt wird und in der Leistungselektronik Spannungs- sowie Strombelastbarkeiten der aus Silizium hergestellten Halbleiter die begrenzenden physikalischen Größen sind, liegt dort, im Unterschied zum Motor, eine leistungsproportionale Kostenabhängigkeit.

Bei allen Maschinenarten muss das Feld „synchron“ mit den Strömen rotieren, um ein konstantes Drehmoment zu erzeugen. Das Feld kann auch stillstehen, dafür müssen die rotierenden Leiter beim Wechsel unter unterschiedliche Feldpolaritäten ihre Stromflussrichtung ändern. Hier erkennt man als erstes Unterscheidungsmerkmal die Klassifizierung, ob das Feld rotiert oder stillsteht.

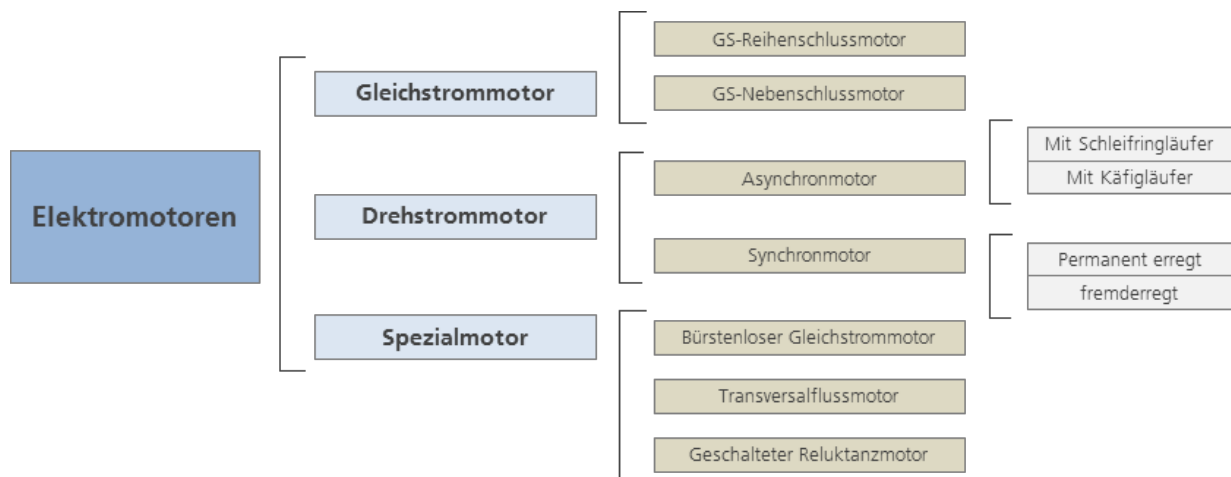
Der Rotor kann prinzipiell als Innenläufer oder auch als Außenläufer gestaltet werden, was ein zweites Klassifizierungsmerkmal darstellt. Außenläufer sind weniger für dynamische Antriebe geeignet, da sie ein höheres Massenträgheitsmoment haben, dafür besonders gut für die direkte Anbringung von Lasten wie beispielsweise die Räder.

Die Art der Stromumschaltung, der Kommutierung, ist ebenso wie die Erregung des magnetischen Feldes schon immer zur Klassifizierung elektrischer Maschinen herangezogen worden. Die klassische Gleichstrommaschine stützt dabei ihre Alleinstellung mehr auf die Eigenschaft der mechanischen Kommutierung über ein Kommutator-Bürsten-System, welches einen Gleichstrom in die zum synchronen Umlauf mit dem Feld notwendigen Wechselströme wandelt, als auf den Betrieb mit Gleichstrom. Die Felderzeugung in der Maschine (oder die Erregung der Maschine) erfolgt dann mittels Permanentmagneten oder mittels einer elektrischen Erregung. Bei letzterem kann die Erregerwicklung parallel, in Reihe oder auch als Mischung aus beidem zur Arbeitswicklung geschaltet werden, was in unterschiedlichen Drehmoment-Drehzahlverhalten resultiert. Bei Reihenschaltung der Erregerwicklung mit der Arbeitswicklung kann die gleiche Maschine auch mit Wechselstrom betrieben werden, um durch wechselnde Feldrichtung bei gleichzeitig wechselnder Stromrichtung wieder ein Drehmoment mit gleicher Wirkrichtung zu erzeugen, weshalb die Bezeichnung Gleichstrommaschine für diese beiden Betriebsweisen bei gleicher Bauart nicht hinreichend ist (typisches Beispiel waren Bahnantriebe). Solche Maschinen haben über den Umfang verteilt oft viele phasenungleiche Stränge, was aber keinen besonderen Einfluss auf den Kupfereinsatz hat. Erfolgt die Kommutierung der

Ströme nicht mechanisch, sondern elektronisch über geschaltete Halbleiterbauelemente, kann man die Gleichstrommaschine auch als elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine oder bürstenlose Gleichstrommaschine bezeichnen. Allerdings haben die Maschinen dann aufgrund des zu begrenzenden Kostenaufwandes in der Elektronik meist wenige Phasen oder Stränge, i. a. benutzt man drei.

Aus der Anfangszeit der elektrischen Energieerzeugung und -übertragung stammen Synchron- und Asynchronmaschinen. Dies waren dreiphasige Maschinenarten mit drei Wicklungssträngen, weil mit drei um 120 Grad zeitlich versetzten sinusförmigen Spannungssystemen und symmetrischer Belastung ein gemeinsamer Rückleiter wegfällt und damit teures Kupfer bei der Energieübertragung in der Größe von 13% eingespart werden kann. Die mit den Dampfturbinen auf einer Welle sitzenden Rotoren der Generatoren waren in diesem Fall – über Schleifringe versorgt – elektrisch erregt, damit man mit der Erregung die Spannung im Netz leicht steuern kann. Motoren hatten aus Kostengründen nur eine zweite, aber im Kurzschluss betriebene Wicklung auf dem rotierenden Teil, wenn die Wicklung des stehenden Teils mit dem Drehstromsystem des Energienetzes verbunden war. Da das elektromotorische Energiewandlungsprinzip umkehrbar ist und somit diese Generatorenart auch als Motoren und Motoren umgekehrt als Generatoren benutzt werden können und seit dieser Zeit die Drehstromversorgung überragende technische Bedeutung hatte, sind alle diese Maschinen als Drehfeld- oder Drehstrommaschinen zu bezeichnen. Bei den Generatoren erzeugt das elektrisch erregte Feld ein mit sich synchron umlaufendes dreiphasiges Drehstromsystem, daher die Bezeichnung Synchronmaschine. Bei allen im elektrischen Verbundnetz angeschlossenen Kraftwerken laufen die Rotoren der Generatoren mit der gleichen Drehzahl, allenfalls entsprechend ihres Betriebspunktes mit einem unterschiedlichen Winkel zueinander. Die am Drehstromsystem angeschlossenen Motoren induzierten bei nichtsynchronem Lauf eine Spannung mit resultierendem Strom in der kurzgeschlossenen Rotorwicklung, sodass aus synchronem Feld und synchronem Rotorstrom bei allerdings (und nur bei) asynchroner Drehzahl wieder ein konstantes Drehmoment entstand. Bei einer Variante dieser Asynchronmaschine (oder Induktionsmaschine) werden die Wicklungsenden der Rotorwicklung anstelle über eine Kurzschlussverbindung über Schleifringe nach außen geführt, sodass auf den Rotorstrom noch regelnd eingegriffen werden kann. Ein Gleichstrom im Rotor führt in diesem Fall wieder zur Funktionsweise einer Synchronmaschine.

Einige Sonderbauformen weichen auf den ersten Blick vom oben Beschriebenen ab, beispielsweise die Unipolarmaschine (Feld- und Stromrichtung zu jedem Zeitpunkt konstant, meist nur eine Windung, daher für hohe Drehzahlen und sehr kleine Spannungen), die geschaltete Reluktanzmaschine (wicklungloser Rotor mit gezahnter Kontur, dessen Zähne durch das Drehfeld mitgezogen werden) oder die Transversalflußmaschine (einfache ringförmige Wicklung, dafür dreidimensionale Feldführung durch gebogene Bleche oder gesintertes Eisenpulvermaterial). Aus der Gleichheit der Berechnung über die Lorentzkraft (oder über die Änderung der magnetischen Energie) ergibt sich jedoch immer eine zumindest vergleichbare mathematische Modellierung in die zwei Komponenten des felderzeugenden und des drehmomenterzeugenden Stromes. Die sogenannte felderorientierte Steuerung nutzt dabei diese Eigenschaft, indem sie zu jedem Zeitpunkt die Ströme in den Wicklungen auf die berechnete oder gemessene Lage des Feldes bezogen einprägt. Über eine Koordinatentransformation der beiden voneinander unabhängigen Ströme werden die Ströme der drei oder ggf. die mehrerer Phasen berechnet. Man kann somit auch das Feld einer permanentmagneterregten Maschine durch Einprägen geeigneter Ströme in der Arbeitswicklung schwächen, um höhere Drehzahlen zu ermöglichen oder um ein Wirkungsgradoptimum einzustellen. Bei der Asynchronmaschine führt die Arbeitswicklung ohnehin den felderregenden sowie den drehmomenterzeugenden Stromanteil. Beide Ströme sind elektrisch orthogonal zueinander und damit geometrisch addierbar, woraus sich prinzipiell bereits eine Wirkungsgradeinbuße gegenüber permanentmagnetisch erregten Maschinen einstellt, wenn man von sonst gleichen Voraussetzungen (gleiche Induktion, gleicher Betriebspunkt) ausgeht. Asynchronmaschinen haben in der Regel kleinere Luftspaltinduktionen als Synchronmaschinen, was ihre Ausnutzung bzgl. des maximalen Drehmomentes im Vergleich der Maschinenarten untereinander zurückfallen lässt. In der folgenden Abbildung 3.1 ist eine Art der Klassifizierung nach Gleichstrommaschine, Drehstrommaschine und Spezialmotoren gezeigt.



**Abbildung 3.1: Gängige Art der Einteilung von Elektromotoren.**

Quelle: DLR.

Es lassen sich bei elektrischen Maschinen zum einen durch die Abführung der Verlustwärme und zum anderen durch eine Anpassung aller genannten Eigenschaften an die spezielle Antriebsaufgabe Vorzüge oder Nachteile herauskristallisieren. Eine pauschale Antwort auf die geeignetste Maschine ist nur unter Nennung aller Randbedingungen angebar. Ein Motor mit hohem Anfahrmoment und gutem Wirkungsgrad muss nicht unbedingt die gleiche Maschine wie ein Motor mit hohem Drehzahlbereich und hohem Wirkungsgrad über den gesamte Drehzahlbereich sein. Bei allen Maschinen sind die Kosten i. a. dem Drehmoment und nicht der Leistung proportional zu setzen. Trotzdem werden für den Fahrzeugantrieb einige Maschinenarten bevorzugt betrachtet. Darauf wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

### 3.3.2 Elektromotoren für den Antrieb von Straßenfahrzeugen

Üblicherweise spricht man heute bei Antriebsmotoren für Elektrofahrzeuge von der Synchronmaschine, sei sie elektrisch oder permanentmagnetisch erregt, ebenso von der Asynchronmaschine, deren Vorteil der günstigeren Herstellung noch durch die Einbringung von Kupfer anstelle von Aluminium im Rotor zu besseren Wirkungsgraden getrieben werden könnte. Die geschaltete Reluktanzmaschine hat keine Wicklung mehr im Rotor, sondern eine einfache Wicklung im Stator und scheint dadurch ebenfalls attraktiv. Die Transversalflussmaschine weicht in den Punkten der Herstellung des magnetischen Kreises ebenso wie des Magnetaufwandes wiederum am meisten von der zuvor genannten ab. Ohne auf die umfangreichen Ausprägungsmerkmale der einzelnen Varianten einzugehen, ist eine Bewertung der genannten Maschinenarten in Tabelle 3.2 gegeben.



**Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Maschinenarten Gleichstrommaschine (GM), Asynchronmaschine (ASM), fremderregte Synchronmaschine (FSM), dauermagneterregte Synchronmaschine (DRM), geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) und Transversalflussmaschine (TFM).**

	GM	ASM	FSM	DSM	SRM	TFM
<b>Wirkungsgrad</b>	- -	+	+	++	+	++
<b>Maximale Drehzahl</b>	- -	++	+	+	++	- -
<b>Volumen</b>	- -	+	+	++	+	-
<b>Gewicht</b>	- -	+	+	++	+	+
<b>Kühlung</b>	- -	+	+	++	++	+
<b>Fertigungsaufwand</b>	-	++	-	-	++	- -
<b>Kosten</b>	-	++	-	- -	++	- -

Quelle: Braess (2007).

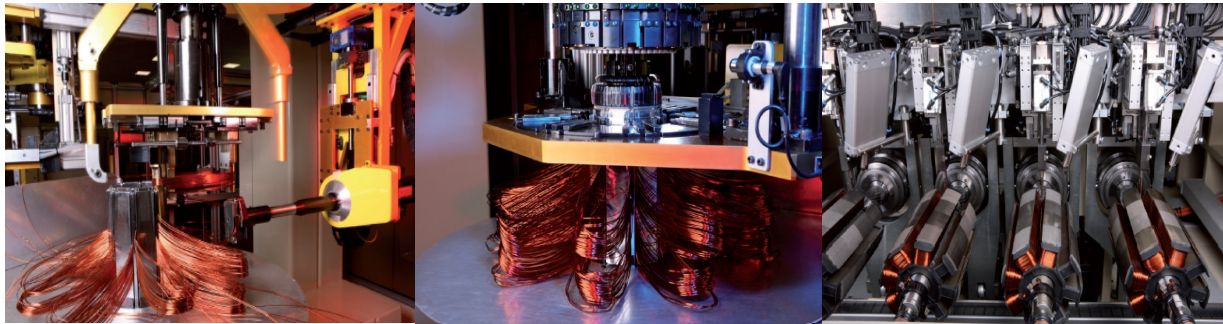
Man erkennt die vorteilhaften Eigenschaften der dauermagneterregten Maschine, weil in ihr das Magnetfeld verlustleistungslos und auf kleinem Bauraum bereitgestellt wird. Muss sie bei höheren Drehzahlen aktiv, das heißt durch zusätzliches Einprägen von Strömen im Feld, geschwächt werden, kann der Vorteil durch die zusätzlichen Stromwärmeverluste aufgezehrt werden. Dann wird man zur etwas größeren fremderregten Maschine greifen (die elektrische Erregung benötigt mehr Bauraum als entsprechend starke Permanentmagnete). Die Asynchronmaschine und die geschaltete Reluktanzmaschine bestehen durch den einfachen Aufbau des Rotors, haben aber kleinere Luftspaltinduktionen und sind deshalb tendenziell größer als die permanentmagneterregte Maschine. Alle Vergleiche zur dauermagneterregten Maschine sind nur bei Einsatz von hochpermeablem Magnetmaterial gültig, nicht beim Einsatz von Ferriten. Ungünstige Verfügbarkeitsabhängigkeiten von den hochwertigen Materialien können dazu führen, dass die kostengünstigen Maschinen ASM und SRM wieder in den Vordergrund rücken. Es darf aber dabei nicht unberücksichtigt bleiben, dass, wie zuvor erwähnt, die zusätzliche Einprägung des felderregenden Stromes zum drehmomenterzeugenden Strom bei der ASM und der SRM zu einer geometrischen Addition beider führt und dass die Leistungselektronik diesen erzeugen muss, d. h. dass Kostenvorteile bei der Maschine durch Kostennachteile in der Elektronik erkaufte werden müssen.

### 3.3.3 Fertigungsverfahren für Elektromotoren

Elektromotoren bestehen aus dem elektromagnetisch aktiven Material, das sind Statorblechpaket inklusive Wicklung sowie Rotorrückschluss mit Magnetsystem, permanentmagnet-, elektrisch- oder nichterregt und den Gehäuseteilen inklusive der Lager und der Lagerschilde. Gegebenenfalls sind spezielle Sensoren zur Messung der Wicklungstemperatur und zur Rotorlageerfassung eingebaut. Die folgende Abbildung 3.3 zeigt typische Fertigungsschritte für die Herstellung von Automobilantriebsmotoren. Dargestellt ist die Fertigung einer fremderregten Synchronmaschine.



Lackisolierter Kupferdraht wird zu Spulen vorgewickelt. Die vorgefertigten Spulen werden in einem Arbeitsgang in die zuvor mit Isolationsfolie isolierten Nuten des Statorblechpaketes eingezogen. Die Statorwicklung wird mit einem Harz getränkt, somit gegen Erschütterungen und Verschmutzung geschützt. Das Statorblechpaket muss passgenau in das Gehäuse gefügt werden, damit der thermische Widerstand definiert bleibt und das Drehmoment übertragen werden kann. In diesem Fall werden die ausgeprägten Pole des Rotors der elektrisch erregten Synchronmaschine lagenweise mit einer Nadelwickelmaschine bewickelt. Auch die Rotorwicklung wird gegen Einflüsse von der Umgebung geschützt und getränkt.



**Abbildung 3.2: Fertigungsverfahren für eine fremderregte Synchronmaschine, Wickeln der Statorspulen (links und mitte), Wickeln des Rotors (rechts).**

Bildquellen: Klein (2011).

Man erkennt, dass bei zunehmender Elektrifizierung von Fahrzeugen die Fertigungsverfahren Aluminiumgießen, Elektrolechstanzen, Kupferdrahtwickeln und diverse Beschichtungstechniken die klassischen Fertigungsverfahren, wie sie für Brennkraftmaschinen benötigt werden, ablösen werden (vgl. hierzu auch Kapitel 7).

### 3.3.4 Elektromotoren für Hilfsantriebe

Hilfsantriebe gibt es heute bereits am Verbrennungsmotor. Beispiele für elektrische Maschinen im Kilowattbereich sind der Starter und der Generator. Beide werden heute über eine mechanische Übersetzung mit der Brennkraftmaschine verbunden, um durch höhere Drehzahlen und dadurch kleinere Drehmomente die Kosten zu minimieren. Kompromisse gibt es bzgl. des Wirkungsgrades. Weitere Hilfsaggregate sind Motorlüfter, Klimaanlage Lüfter, Pumpen für Treibstoff und Lenkhilfe, um nur einige zu nennen. Es lassen sich über hundert weitere Elektromotoren für Fahrzeuganwendungen aufzählen, vom CD-Spielerantrieb über Nockenwellenversteller bis zum Antrieb für den Spoilermechanismus. Eine gern genannte Anwendung vieler Antriebsmotoren sind die Sitze mit ihren Verstellvorrichtungen und Belüftungssystemen.

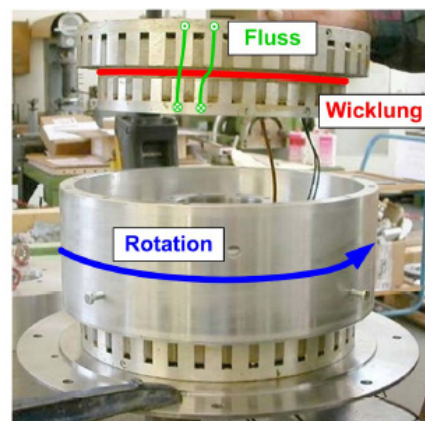
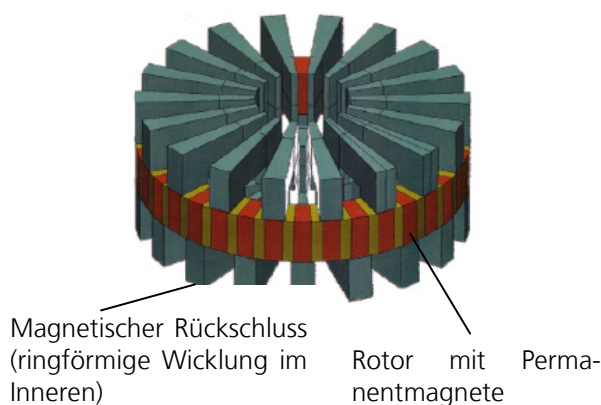
Für zukünftige Elektrofahrzeuge werden heute vom Verbrennungsmotor direkt mechanisch angetriebene Hilfsantriebe elektrisch angetrieben werden müssen, z. B. die Unterdruckbereitstellung für die Bremskraftunterstützung. Zum anderen kommen neue Hilfsantriebe wie z. B. Luftverdichter für Brennstoffzellenfahrzeuge hinzu.

Für diese Studie wird davon ausgegangen, dass die Produktion von elektrischen Hilfsantrieben bzw. deren Elektromotoren nach einem einheitlichen Schema geschieht, dass also im Wesentlichen die elektrischen Maschinen dann über eine Leistungselektronik elektronisch kommutiert sind. Dies kann für Antriebe ab

etwa 500 W angenommen werden, kleinere Antriebe werden i. a. mechanisch kommutierte Motoren bleiben. Es gibt keine generelle Klassifizierung hierfür. Die Wicklung eines elektronisch kommutierten Motors muss nicht unausweichlich in bidirektionaler Richtung vom Strom durchflossen werden. Für eine bessere Ausnutzung des Kupfers bei Motoren hoher Leistung ist dies nötig, nicht unbedingt für Motoren kleinerer Leistung, z. B. für Hilfsantriebe wie Lüfter. Unidirektionale Umrichterschaltungen verkleinern etwas den Aufwand in der Elektronik. Man macht aber auch keinen Fehler, wenn man die elektronischen Fertigungsverfahren etwas zu stark bewertet.

### 3.3.5 Entwicklungspotential bei Elektromotoren

Ein Beispiel für Elektroantriebe, die noch keine weite Serienverbreitung haben, ist die Transversalflussmaschine, wie anfangs erwähnt, sie ist in der folgenden Abbildung 3.3 dargestellt. Sie wurde im Workshop auch im Besonderen angesprochen und deren Arbeitsweise diskutiert. Sie unterscheidet sich von konventionell aus ebenen Blechen aufgebauten Maschinen und in den magnetischen Eisenkreis verkettet eingebrachten Kupferdrahtwindungen dadurch, dass die Wicklung eine einfache Ringwicklung ist und der magnetische Kreis möglichst häufig damit verkettet aufgebaut wird. Dies verlagert die Einfachheit der Eisenkreisbearbeitung (Bleche stanzen) und Schwierigkeit der Kupfer-Wickeltechnik herkömmlicher Maschinen auf die Einfachheit der Wickeltechnik und die Schwierigkeit der Eisenkreisgestaltung. Jedoch steht hier ein hohes Entwicklungspotential offen, was den Einsatz anderer Materialien und neue Fertigungstechnologien anbelangt. Dreidimensionale Eisenkreise können mit Soft Magnetic Composite Material hergestellt werden, dies besteht aus voneinander isolierten Eisenpulverteilchen, die höhere Ummagnetisierungsfrequenzen zulassen und für geringere Verlustleistungen sorgen, dagegen aber auch in der maximalen Induktion geringere Ausnutzung zulassen. Auch bei der Transversalflussmaschine muss die Frequenz des Stromes der Geschwindigkeit der umlaufenden Magnete entsprechen, sodass sie nach Synchronmaschinenprinzip arbeitet. Die Polpaarzahl ist i. a. hoch und damit auch die Frequenz der Ströme. Sie hat keine Wickelköpfe, was den ohmschen Widerstand minimiert.



**Abbildung 3.3: Transversalflussmaschine**

Bildquellen: Parspour (2010).

Die Optimierung des Einsatzes von Permanentmagnetmaterial stellt eine Herausforderung dar. Hochpermeables Material aus Seltenen Erden hat die höchsten Energiedichten, wird aber auf dem Weltmarkt immer teurer. Dem gegenüber steht günstigeres Ferritmaterial, was aber gegenüber der ASM keine Vorteile bringt. Kombinationen von permanentmagnetischer und elektrischer Erregung können Vorteile bringen, wenn man die volle Feldstellbarkeit der elektrischen Erregung zusammen mit der magnetischen Entlastung

des Rückschlusses durch Permanentmagnete nutzt. Auch die Kombination unterschiedlicher Magnetmaterialien lässt ein Umprogrammieren der Magnete im Betrieb zu (Lee et al. 2008). Hier besteht noch signifikanter Forschungsbedarf hinsichtlich des optimalen Einsatzes der Materialien.

Weiteres Entwicklungspotential besteht in der Modularisierung und Standardisierung von Antriebsmotoren, um hohe Stückzahlen erreichen zu können. Dieser Aspekt wurde im Workshop immer wieder aufgegriffen. Die Fertigungskosten von Elektroantrieben können heute noch nicht mit den Fertigungskosten von Antriebssträngen, die auf Plattformstrategien in Millionenstückzahlen hergestellt werden, verglichen werden.

Einzelradantriebe erlauben die Darstellung weiterer Funktionalitäten wie Allradtauglichkeit und gezielte Drehmomentverteilung. Alle denkbaren Motor-Ausführungsformen werden vereinzelt beschrieben, darunter auch elektrostatische Motoren (Schöttle 2007) und Axialflussmotoren (Krebs et al. 2010). Hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Effizienzsteigerung, des Leichtbaus und der Integration weiterer Funktionen wie der Bremse. Die Integration der Elektronik und die Integration des Radantriebs in das gesamte Fahrwerk, das mit aktiven Stellgliedern wie Dämpfung und Lenkung und Sturzverstellung versehen werden kann, stellt ein weiteres Entwicklungspotential mit erheblichem Forschungsbedarf dar.

Gegenüber einem Fahrtrieb, bestehend aus einem zentral angeordneten Elektromotor, bestehen noch weitere Konzepte, bei denen mehrere Elektromotoren eingesetzt werden, beispielsweise beim leistungsverzweigten Hybridantrieb von Toyota. Dies ist ein Beispiel für die Integration von Elektromotoren und Getrieben. Wie im Kapitel Leistungselektronik erwähnt, stellt die Kombination der Kompetenzen Getriebetechnik und Elektromaschinenbau zusammen mit der Elektronik die Anforderung an den zukünftigen Fachkräftebedarf dar.

### 3.4 Leistungselektronik & Umrichter

Die zunehmende Elektrifizierung von Fahrzeugen wird sich im Besonderen auf die elektronischen Bauteile und deren Produktionsverfahren auswirken. Prognosen gehen davon aus, dass sich der Wertschöpfungsanteil von Elektronik im Fahrzeug in den nächsten 10 Jahren deutlich erhöhen wird, die höchsten Werte liegen heute bereits bei 35%, die Tendenz geht allgemein von heute etwa 20% bis 40% in den nächsten 10 Jahren aus. Eine weitreichende Eigenschaft der Elektronik ist ihre Fähigkeit, die Funktionalität mithilfe ihrer Software stetig anpassen zu können. Die Auswirkungen auf die Gesellschaft sind aus der Anwendung und Nutzung der Computer- und Konsumgübertechnik ablesbar. Die Softwareentwicklung hat am Entwicklungsaufwand von heutiger Leistungselektronik einen nicht unerheblichen Anteil. Das bedeutet, dass Fachpersonal mit antriebstechnischem, elektronischem und programmiertechnischem Hintergrund zunehmen müssen.

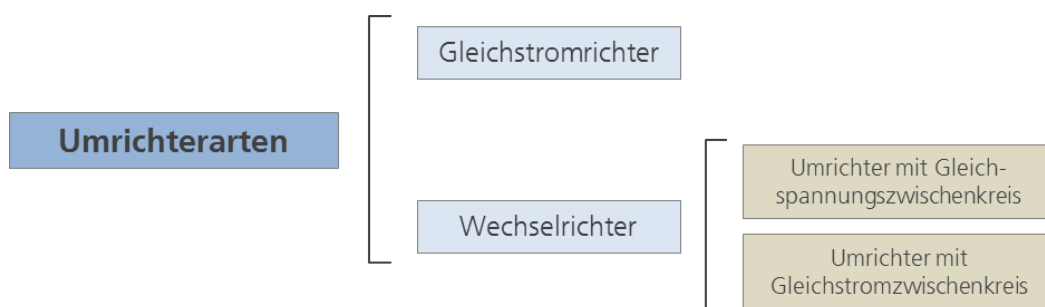
#### 3.4.1 Leistungselektronik für Fahrzeuge

Der Begriff der Leistungselektronik als Bezeichnung für elektronische Umrichter hat sich etabliert. Leistungselektroniken, die für Fahrzeugantriebe bzw. in Fahrzeugen eingesetzt werden, sind entweder für die Energiewandlung der Antriebsleistung oder Teilleistungen davon vorgesehen, oder sie wandeln im Bereich der Hilfsaggregate in vielfältigen Anwendungen elektrische Energie kleinerer Leistung. Die Unterscheidung von Leistungselektronik und Steuerelektronik wird gewöhnlich dort gebraucht, wo der informationstechnische oder steuerungstechnische Elektronikanteil mit Leistungen von wenigen Watt als eigene Komponente betrachtet werden kann.

Die automobilen Umwelthanforderungen sind für beide oben genannten Anwendungsbereiche gleich und stellen an die im Gegensatz zu mechanischen Bauteilen relativ empfindlichen elektronischen Bauteile sehr hohe Anforderungen. Typische Schwierigkeiten liegen in der Alterung von chemischen Stoffen, der Beschleunigung von Diffusionsprozessen in legierten Halbleitermaterialien bei hohen Temperaturen und der thermischen Wechselbeanspruchung der vielen Löt- bzw. Verbindungsstellen.

Unterschiede bestehen bzgl. der beiden genannten Anwendungsbereiche in der Größe der zu wandelnden elektrischen Leistung und damit in erster Näherung auch der Kosten, ebenso in der Anbindung an das (oder an ein) Kühlsystem. Während die für den Antrieb vorgesehenen Leistungselektroniken fahrzeugspezifisch entwickelt werden, können Leistungselektroniken für Hilfsaggregate in größeren Stückzahlen, auch fahrzeugherstellerübergreifend, hergestellt werden. Zu letzteren gehören heute beispielsweise schon die Leistungselektroniken für den Generator, für Pumpen, Lüfter oder Zusatzheizungen.

Die Leistungselektroniken wandeln im Wesentlichen aus einem Gleichspannungsnetz elektrische Energie zur Versorgung eines mehrphasigen Wechselstromnetzes für einen Motor, dann sind es Wechselrichter, allgemein Umrichter genannt. Oder sie wandeln aus einem Gleichspannungsnetz auf ein anderes Gleichspannungspotential, dann sind es DC/DC-Wandler. Als dritte Variante kommt das Ladegerät in Frage, sei es stationär oder mobil mitgeführt, als Wandler von der Wechselspannungs- auf die Gleichspannungsseite. Bestimmte Schaltungstopologien lassen es im Einzelfall zu, die Energie auch bidirektional zu wandeln, was bei Fahrumrichtern stets der Fall ist. Im Gegensatz zu heutigen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird zukünftig elektrische Energie auf einer Spannungsebene genutzt, die beim Berühren gefährlich ist. Gleichspannungen unterscheiden sich in ihrer Gefährlichkeit von Wechselspannungen, sodass der Umgang mit ihnen gesondert geschult werden muss. Zur Gewährleistung der Sicherheit im Umgang mit diesen Spannungen und mit den Bauteilen wird daher künftig das Berufsbild des Elektrikers in den Vordergrund treten.



**Abbildung 3.4: Klassifizierung von Umrichterarten.**

Quelle: DLR.

Umrichter werden traditionell danach eingeteilt, ob sie die an sie angeschlossene Last mit aufgeschalteten Spannungen oder eingprägten Strömen betreiben. Erster Fall erlaubt i. a. eine weitgehend rückkopplungsfreie Anbindung an das speisende Netz und wird schaltungstechnisch mit einer Kondensatorbatterie im Zwischenkreis dargestellt, der zweite Fall hat direkte Auswirkung auf das speisende Netz aufgrund der Stromgleichheit. Am Gleichspannungsnetz betriebene Umrichter arbeiten meist mit einem Spannungszwischenkreis, wobei einzelne Auswirkungen auf die Batterie zugelassen werden. Abbildung 3.4 gibt einen Überblick über die Einteilung.

Die Funktionalitäten der Umrichter lassen sich prinzipiell eingliedern in einen allgemeinen steuerungs- und regelungstechnischen Anteil, der dem eines heutigen Motorsteuerungsgerätes für einen Verbrennungsmotor entspricht. Dazu kommen als kostenrelevante Funktionalitäten die Sensorik wie Spannungs-, Strom- und Temperaturerkennung, ggf. die Rotorlagesensorik, die leistungsschaltende Endstufe der Elektronik und



deren Treiberschaltung, die Zwischenkreisstabilisierung üblich in Form von Kondensatoren und ein für die elektromagnetische Verträglichkeit notwendiger filtertechnischer Zusatz. Die Kosten sind i. a. proportional zur Leistung, im Gegensatz zum Motor, bei dem das Drehmoment die Baugröße und damit die Kosten bestimmt. Die Kosten eines Antriebs, bestehend aus Motor und Leistungselektronik, werden demnach weder drehmoment- noch leistungsproportional anzusetzen sein, sondern je nach Anwendungsfall einem Kompromiss aus beiden entsprechen. Entwicklungsschwerpunkte sind dabei die Reduktion der Teilevielfalt und die Integration möglichst vieler Zusatzfunktionen. So ist der DC/DC-Wandler zur Versorgung des 12 V-Bordnetzes oft im Umrichtergehäuse integriert. Ein Beispiel dafür ist in der folgenden Abbildung 3.5 gezeigt.



**Abbildung 3.5: Umrichter mit integriertem DC/DC-Wandler.**

Bildquelle: Daimler AG, IAA 2009.

DC/DC-Wandler dienen heute zur Anpassung von herkömmlichen Bordnetzkomponenten, höheren Spannungen für Frontscheibenheizungen, Konstanthaltung der Lampenspannung bei häufigen Start-Stopp-Vorgängen oder zum Zünden der Quecksilberdampf-Hochdrucklampen.

### 3.4.2 Entwicklungspotential bei Leistungselektronik

Im Expertenworkshop wurden das Thema Hardwareentwicklung, speziell zur Kühlung, zur Modularisierung und zur Standardisierung angesprochen, ebenso das Thema Laden, sei es an Schnellladestationen, über induktive Ladestationen oder über „Energy-harvesting“-Konzepte.

Entwicklungspotential besteht für den Automobilbereich in der gezielten und gleichmäßigen Kühlung, das umfasst auch die Integration der Leistungselektroniken in ein effizientes Energie- bzw. Thermomanagement und in einer geeigneten Modularisierung und Standardisierung von Leistungselektroniken. Modularisierungs- und Standardisierungsaktivitäten betreffen dabei nicht nur die hardwareseitigen Komponenten, sondern etwa in gleichem Maße die softwareseitigen Entwicklungen (Stützle et al. 2011). Oftmals kommt der letztgenannte Punkt in der Betrachtung zu kurz.

Zudem stellt sich aus Komfortgründen die Frage, wie die Batterie möglichst berührungslos beim Abstellen des Fahrzeuges wieder geladen werden kann. Gegenüber einem einfachen Stecker gibt es auf den ersten Blick kaum kostenattraktiven Wettbewerb. Unter dem Miteinbezug des Ladegerätes in die Kostenbetrachtung kann es aber durchaus zu einer Berechtigung berührungsloser Ladeverfahren kommen. Die transformatorische Kopplung innerhalb des Ladegerätes wird dabei in einen stationären (primären) und einen im Fahrzeug verbleibenden (sekundären) Teil aufgeteilt. So kommt es zwangsläufig zu einer Verringerung der Primärteile, wenn man davon ausgeht, dass man mehrere Fahrzeuge nacheinander lädt und dafür insgesamt weniger Ladestationen als Fahrzeuge braucht. Teile eines mitgeführten eigenständigen Ladegerätes könnten auch als Systemkomponenten für die berührungslose Übertragung mitgenutzt werden. Hier besteht zweifelsfrei hohes Entwicklungspotential.

Bzgl. der Materialien ist in der Leistungselektronik wenig Entwicklungspotential bei den metallischen Rohstoffen wie Aluminium oder Kupfer zu suchen. Das Hauptpotential liegt in der Kombination von informationstechnischer Entwicklungsarbeit, das sind neue Ansteuerverfahren, Programmierung und Schnittstellenbeherrschbarkeit, zusammen mit den auf dem veredelten Material Silizium basierenden Halbleiter-Bauelementen. Beispiele dafür sind Kombinationen von steuerungstechnischen und leistungsschaltenden Strukturen auf einem Chip, aber auch Aufbautechnologien mit mehreren Chips in einem Gehäuse. Leistungshalbleiter auf Siliziumcarbidgebasis erlauben höhere Einsatztemperaturen. Große Herausforderungen liegen in der Beherrschung der Schnittstellen zwischen Elektronik und Mechanik. Hier besteht Fachkräftebedarf.

Bisher ist die Integration der Leistungselektronik in die Motoren noch nicht bemerkenswert in Erscheinung getreten. Vorteilhaft wäre dies durch die Einsparung von Gehäusen mit deren Kühlungs-, Dichtigkeits- und Anschlussaufwänden, ebenso ergäbe sich eine Erleichterung bzgl. der elektromagnetischen Verträglichkeit. Auch hier besteht noch Entwicklungspotential.

Weiterer Entwicklungsbedarf liegt in der Untersuchung, wie Teile der elektrischen Antriebskomponenten in die Fahrzeugstruktur integriert werden können. Bei Batterien und deren Umhausungen oder bei der Schutzeinhausung von elektrischen Leitungen ist das bereits angedacht, weniger hingegen bei den Gehäusen von Leistungselektroniken.

Festzuhalten ist, dass zukünftig die Elektronikindustrie in den Vordergrund rücken wird, wie es sich in den letzten Jahren bereits stetig durch die zunehmende Anzahl an Steuergeräten gezeigt hat. Der Schwerpunkt wird sich dann zugunsten der leistungselektronischen Komponenten verschieben. Der Sicherheitsaspekt wirkt sich ebenso auf den Fachkräftebedarf aus. Halbleiterspezialisten, aber auch die Zahl der Antriebspezialisten mit fundierter Elektromaschinenbau- und Elektronikkompetenz wird zunehmen müssen. Dies ist im Übrigen auch außerhalb der Automobilwirtschaft der Fall.

## 3.5 Batterie

Neben dem Elektromotor ist die wiederaufladbare Batterie (Akkumulator) die wichtigste Komponente elektrifizierter Fahrzeugantriebe. Die Anforderungen an sie hängen ab von Antriebskonzept, Leistungsklasse und gewünschter Reichweite. Zu den Anforderungen zählen v. a. Energiedichte, Leistungsdichte, Zyklenfestigkeit, Preis, Sicherheit und Verfügbarkeit.

### 3.5.1 Akkumulator-Technologien für den Einsatz als Traktionsbatterien

Als Traktionsbatterien bezeichnet man die Gruppe der Sekundärbatterien, die ihre Verwendung im Antrieb elektrifizierter Fahrzeuge finden. Die Entwicklung begann mit den Blei-Akkus, die noch heute als Starterbatterien im Einsatz sind. Aufgrund besserer Eigenschaften nutzte man später ab Ende der 90er Jahre vor allem in den ersten Hybridfahrzeugen, wie dem Toyota Prius, die NiMH-Batterie. Der BMW X6 Active Hybrid nutzt heute noch eine NiMH-Batterie. Diese wird nun aber mehr und mehr von der Lithium-Ionen-Batterie abgelöst, da sie sich sowohl für die Anwendung in Hybrid-Varianten, wie auch in reinen Elektrofahrzeugen eignet. Experten sind sich einig, dass die Lithium-Ionen-Batterie in den nächsten 10 bis 20 Jahre die Elektromobilität prägen wird (Thielmann et al. 2010). Diese Einschätzung wurde auch in den durchgeführten Workshops von allen Experten bestätigt.

In Tabelle 3.3 sind typische Traktionsbatterien und deren Anwendung in verschiedenen Fahrzeugklassen aufgelistet.

**Tabelle 3.3: HEV hybrid electric vehicle, PHEV parallel hybrid electric vehicle, EV (battery) electric vehicle.**

Verwendung	Chemie	Speicherkapazität
Elektrofahrrad	NiMH, Li-Ion	360 Wh
Starterbatterie	Blei-Akku	0,5 – 1 kWh
Golf-Fahrzeug	Blei-Akku	8 kWh
Gabelstapler	Blei-Akku	18 kWh
HEV	NiMH, Li-Ion	1 – 2 kWh
PHEV	NiMH, Li-Ion	5 – 15 kWh
EV	NiMH, Li-Ion	20 – 40 kWh

Quelle: Kroll (2011) nach Buchmann (2009).

In Tabelle 3.4 sind die Energiedichten der wichtigsten Energieträger in einer Übersicht dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass Lithium-Batterien die höchste Energiedichte der Batterien erreichen. Ihre Energiedichte ist jedoch etwa um den Faktor 100 geringer als die von konventionellen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel. Andere Batterietechnologien, wie die NiMH-Batterie oder die Blei-Batterie, liegen noch deutlich darunter.

Tabelle 3.4: Energiedichten der wichtigsten Energieträger.

Kraftstoff	Energiedichte (Wh/kg)
Wasserstoff	39.300
Propangas	13.900
Butangas	13.600
Diesel	12.700
Benzin	12.200
Ethanol	7.850
Kohle	6.600
Methanol	6.400
Holz	2.300
Lithium-Kobalt Batterie	150
Lithium-Mangan Batterie	120
NiMH Batterie	90
Blei-Batterie	40

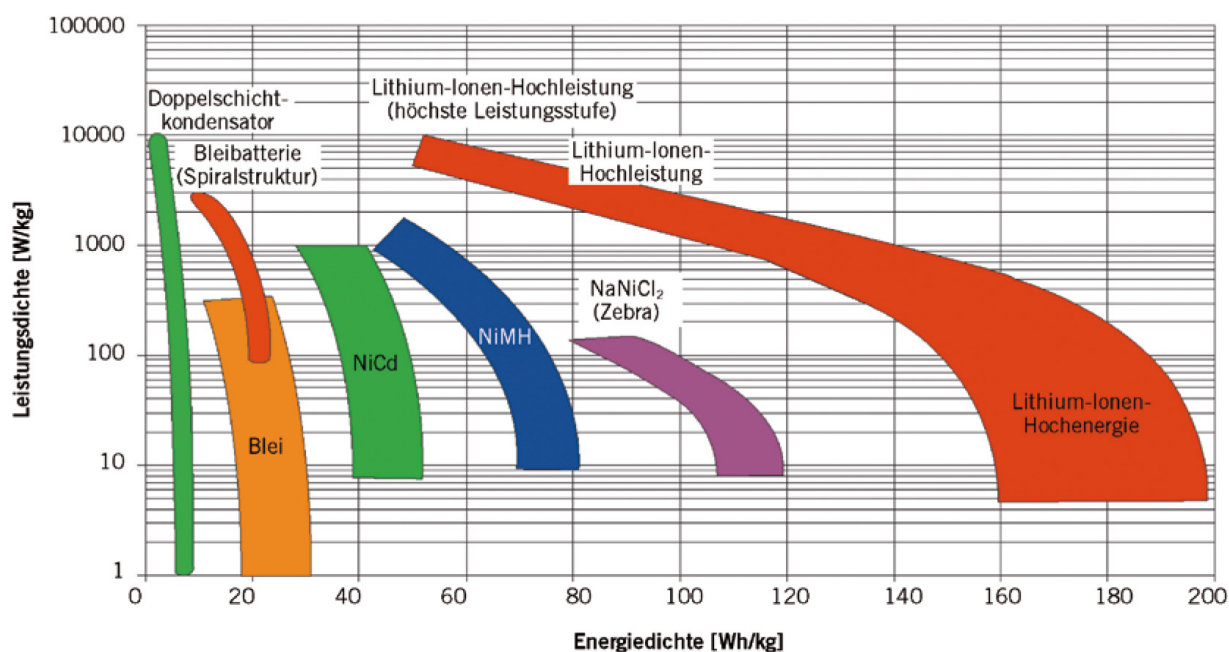
Quelle: Kroll (2011) nach Buchmann (2009).

Abbildung 3.6 stellt die Batterietechnologien Blei, NiCd, NiMH und Lithium-Ionen hinsichtlich ihrer spezifischen Leistung und ihrer spezifischen Energie gegenüber. Es wird auch in dieser Abbildung deutlich, dass die Lithium-Ionen Batterie den anderen Batterietechnologien wie Blei-Batterie oder NiMH Batterie in Bezug auf die Energie- und Leistungsdichte deutlich überlegen ist.

Erfolgversprechende Weiterentwicklungen der Li-Ionen-Technologie sind Lithium-Polymer-, Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Akkumulatoren. Diese Technologien versprechen eine bis zu zehnfach höhere Energiedichte gegenüber herkömmlichen Li-Ionen-Akkumulatoren, doch besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf.

Eine sehr unkonventionelle Technologie sind Redox-Flow-Akkumulatoren. Bei diesen wird das energiespeichernde Material in Form einer flüssigen, chemischen Verbindung außerhalb der Zelle gelagert (Oertel 2008). Durch Austausch des verbrauchten durch ein unverbrauchtes Material steht dem Speichersystem wieder Energie zur Verfügung. Aufgrund der vergleichsweise noch niedrigen Energiedichte von etwa 25 bis 50 Wh/kg (für den Fall der Vanadium-Brom-Redox-Flow-Batterie) ist dieser Speichertyp momentan nur für den stationären Einsatz geeignet. Durch die Verwendung anderer chemischer Verbindungen kann die Energiedichte jedoch gesteigert werden, so dass diese Technologie auch für die mobile Anwendung attraktiv werden könnte. Hierzu besteht noch Forschungsbedarf, um die Batterien fahrzeugtauglich zu gestalten.





**Abbildung 3.6: Derzeitiger Status von Akkumulator-Technologien.**

Bildquelle: Möller (2011).

Natrium-Schwefel-Batterien (NaS-Batterien) wurden ursprünglich in den 1980 für BEVs entwickelt, doch konnten sie sich aufgrund der Gefahr des Austretens von flüssigem Natrium und Schwefel bei Unfällen nicht durchsetzen. Sie werden zur Zeit vorwiegend stationär für den Ausgleich von Netzschwankungen eingesetzt. Weltweit werden sie nur von einem Unternehmen hergestellt, der Tokyo Electric Power Company (TEPCO) in Japan (Oertel 2008).

Im Folgenden wird auf heute in Fahrzeugen bzw. Fahrzeug-Prototypen verwendete Akkumulator-Technologien eingegangen.

### 3.5.1.1 Blei-Akkumulator

Der Blei-Akkumulator ist vor allem bekannt als Starterbatterie des Fahrzeugs. Dieser wird ausschließlich für die Stromversorgung des Startvorgangs sowie zur Stromversorgung von Komfort-Funktionen wie Radio oder Sitzheizung bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor genutzt. Er wird über die Lichtmaschine während der Fahrt geladen. Die Blei-Batterie zeichnet sich durch eine Energiedichte von etwa 30-50 Wh/kg (Babiel 2009) aus. Bei angenommenen 200 Zyklen pro Jahr ist sie 2 bis 5 Jahre einsatzbereit. Außerdem besitzt sie eine hohe Sicherheit und geringe Kosten der Herstellung (Anderman 2000). Erste Elektrofahrzeuge nutzen Blei-Batterien auch als Traktionsbatterien. Grund hierfür ist vor allem die „...relative Preisgünstigkeit (<100 €/kWh)...“ (Mock 2010). Ein Beispiel ist das Elektrofahrzeug General Motors EV1. Das Problem der Blei-Batterie besteht in ihrem schlechten Verhältnis von Gewicht und gespeicherter Energie. Es ist nötig um eine einzige Kilowattstunde speichern zu können, ca. 30 kg Batterie zu transportieren. Ein durchschnittliches Elektrofahrzeug benötigt etwa 16 kWh elektrische Energie um 100 km unter guten Bedingungen fahren zu können. Dies würde bedeuten, man müsste mit etwa einer halben Tonne Blei-Batterien im Fahrzeug rechnen, um 100 km fahren zu können. Dies ist allerdings nur ein theoretischer Wert, denn die Blei-Batterien dürfen nicht tiefentladen werden. Es stehen also im konkreten Fall wesentlich weniger als die 16 kWh der 500 kg Batterie für die Fahrt zur Verfügung. Diese Gründe führten schnell

dazu, dass die Blei-Batterie, von den anderen im Folgenden genannten Batterie-Typen als Traktionsbatterie abgelöst wurde.

Der Aufbau der Blei-Akkus zeigt zwei Bleiplatten, welche die Elektroden bilden. Zwischen den Platten befinden sich die Separatoren, welche eine direkte Berührung der positiven und negativen Elektrode, und somit einen Kurzschluss, verhindern. Der Ladungstransport wird möglich durch die Elektrolytflüssigkeit. Diese ist im Falle einer Bleibatterie Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ). Im Laufe der Jahre ihrer Nutzung altern Bleiakumulatoren durch ihre innere Korrosion.

Der Blei-Akku ist aktuell dennoch wieder mehr im Fokus der Entwicklung, da er als Starterbatterie in den sogenannten Micro-Hybrid-Fahrzeugen, also Fahrzeuge, welche mit einer Start-Stopp-Automatik ausgestattet sind und es ermöglichen Bremsenergie zu rekuperieren, eingesetzt wird. Hierfür ist eine spezielle Anpassung der Batterie nötig. Somit trägt auch der Blei-Akku zu einer Elektrifizierung im Antriebsstrang bei, wenn auch nicht als Traktionsbatterie im engeren Sinne.

### 3.5.1.2 Nickel-basierte Akkumulatoren

#### NiCd-Akkumulator

Zur Verbesserung der Energiedichte des Bleiakkumulators wurde zunächst der Nickel-Cadmium-Akkumulator entwickelt. Aufgrund der Verwendung des gesundheitsschädlichen Schwermetalls Cadmium und des ausgeprägten Memory-Effekts ist diese Art von Batterie ungeeignet für die Verwendung als Traktionsbatterie. Sie stellt nur einen Entwicklungsschritt vom Blei-Akkumulator zum Nickel-Metallhydrid-Akkumulator dar.

#### NaNiCl<sub>2</sub>-Akkumulator (ZEBRA)

Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren ( $NaNiCl_2$ , ZEBRA) haben eine hohe Lebensdauer und eine hohe gravimetrische Energiedichte. Zudem sind sie robust und vollständig recyclingfähig. Die Betriebstemperatur liegt bei 270 bis 350 °C, so dass diese Akkumulator-Technologie zu den Hochtemperaturbatterien zählt (Linden et al. 2001). Trotz aufwändiger thermischer Isolation liegen die Verluste bei etwa 5 W/kWh Speichervermögen (Naunin 2007). Aufgrund der thermischen Verluste ist es umstritten, ob diese Technologie für den Einsatz im PKW sinnvoll ist (Oertel 2008).

Die General Electric Company hat 2010 in den USA Produktionsanlagen zur Serienproduktion von Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren aufgebaut (GE Transportation 2009). Einsatzgebiete sind hierbei die Stabilisierung des elektrischen Versorgungsnetzes, Versorgung entlegener Mobilfunk-Sendestationen, aber auch hybridisierte Schienenfahrzeuge.

#### NiMH-Akkumulator

Aus dem Nickel-Cadmium-Akkumulator wurde der Nickel-Metallhydrid-Akkumulator entwickelt. Seinen Namen verdankt er der Art seiner Elektroden. Die positive Elektrode besteht aus Metallhydrid und die negative aus Nickel-Hydroxid. Er besitzt etwa die doppelte Energiedichte eines Blei-Akkus. In einem Kilogramm können etwa 60 bis 120 Wh Energie gespeichert werden. Bei einer Reichweite von 100 km würde dies einem Batteriegewicht von etwa 250 kg entsprechen. Weitere Vorteile der Technologie sind eine sehr einfache Lagerung und Transport (Buchmann 2003). Darüber hinaus sind bei dieser Art der Batterie nur sehr wenige giftige bzw. gesundheitsschädliche Stoffe enthalten, was die Batterie umweltfreundlicher in ihrem Recycling macht (Buchmann 2003). Allerdings gibt es auch eine Reihe von Nachteilen, die gegen die Verwendung von NiMH-Akkumulatoren als Traktionsbatterien sprechen. Zu nennen sind die begrenzte Lebensdauer von 200 bis 300 Zyklen, eine sehr hohe Selbstentladung, und ein hoher Wartungsaufwand, da der NiMH-Akkumulator regelmäßig komplette Entladungen benötigt. NiMH-Batterien werden in den Hybridfahrzeuggeneration wie dem Toyota Prius (erste und zweite Generation) sowie dem BMW X6 Active Hybrid eingesetzt.

### 3.5.2 Lithium-Ionen-Akkumulator

Der Lithium-Ionen-Akkumulator stellt den aktuellen Stand der Technik in Bezug auf Traktionsbatterien dar, weshalb die folgenden Kapitel vorwiegend dieser Technologie gewidmet sind. Lithium ist das leichteste Metall, hat das größte elektrochemische Potential und liefert die größte Energiedichte pro Gewichtseinheit (Buchmann 2003). Die Energiedichte gängiger Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist mit 110 bis 160 Wh/kg deutlich höher als die der übrigen Akkumulator-Technologien. Es ist somit möglich, ein günstigeres Verhältnis zwischen der gespeicherten Energie und der Masse der mitzuführenden Batterie zu erreichen. Eine 16 kWh-Vergleichsbatterie wiegt bei der Lithium-Ionen-Technologie nur noch etwa 100 bis 145 kg. Im Vergleich hierzu waren es bei der NiMH-Batterie 250 kg und bei der Blei-Batterie sogar 500 kg.

Entsprechend der chemischen Materialgrenzen wäre bei der Lithium-Ionen-Batterie eine Energiedichte von 640 Wh/kg möglich (Mock 2010). Dies würde zu einem Gewicht der Vergleichsbatterie von nur 25 kg führen, allerdings handelt es sich hierbei lediglich um die theoretischen Grenzen. Der Wartungsaufwand ist niedriger und die Selbstentladung geringer als bei der Nickel-Metallhydrid-Batterie. Problematisch ist der Transport der Batterien. Hier sind erhöhte Sicherheitsmaßnahmen und Temperierung nötig. Darüber hinaus ist der Herstellungsprozess deutlich größer als bei den anderen Batterietypen. Die Lithium-Ionen-Batterie hat dennoch mit Abstand das höchste Potential für die Nutzung als Traktionsbatterie in den nächsten 10 bis 20 Jahren (Möller, K., in: Thielmann (2010)).

Zurzeit werden Lithium-Ionen-Batterien von allen namhaften Fahrzeugherstellern für die Nutzung als Traktionsbatterie in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt. Beispielhaft zu nennen sind hier der BMW Mini E, der Smart Fortwo ED, der Chevrolet Volt, der Mitsubishi iMiev und der Nissan Leaf.

Im Gegensatz zu den anderen genannten Arten von Traktionsbatterien bilden die Lithium-Ionen-Akkumulatoren eine ganze Familie von verschiedenen Zellchemien. Es gibt also nicht die eine Lithium-Ionen-Batterie, sondern eine Vielzahl an verschiedenen Möglichkeiten der chemischen Zusammensetzung der Kathodenmaterialien und ihrer Paarung mit einem Anodenmaterial. Die fünf aussichtsreichsten Zellchemien sind zurzeit:

- Lithium-Nickel-Kobalt Aluminiumoxid (NCA),
- Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC),
- Lithium-Manganoxid (LMO),
- Lithium-Titanat (LTO) und
- Lithium-Eisen-Phosphat (LFP).

Alle Zellchemien haben spezifische Vor- und Nachteile, welche im Folgenden genauer betrachtet werden (Abbildung 3.7).

#### **Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)**

NCA hat die chemische Formel  $\text{LiNiCoAlO}_2$ . Neben Lithium sind in einer solchen Kathode also die Stoffe Nickel, Kobalt, Aluminium und Sauerstoff enthalten. NCA besitzt wesentliche Vorteile gegenüber anderen Kathodenmaterialien im Bereich der Lebensdauer, der spezifischen Energie und der spezifischen Leistung. Wesentliche Nachteile bestehen aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten und einem höheren Sicherheitsrisiko im Vergleich zu anderen Zellchemien.

#### **Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)**

Bei dieser Zellchemie sind verschiedene Gewichtungen der einzelnen chemischen Elemente möglich. Am meisten verbreitet ist die Gewichtung mit jeweils einem Drittel Nickel, Kobalt und Mangan zusätzlich zum

Lithium in der Kathode. NMC bietet in allen Bereichen (spezifische Leistung, spezifische Energie, Sicherheit, Lebensdauer und Kosten) eine sehr gute oder gute Leistung (BCG 2010). Aus diesem Grund wird erwartet, dass sich NMC im Bereich der Traktionsbatterien als Kathodenmaterial hoher Beliebtheit erfreuen wird. Viele Hersteller setzen schon jetzt auf diese Chemie.

#### **Lithium-Manganoxide (LMO)**

LMO ist ein Kathodenmaterial, welches neben Lithium auch Mangan und Sauerstoff in sich vereint und die chemische Formel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  hat. Dies ist eine sehr ausgewogene Zellchemie mit Vorteilen im Bereich der Kosten, der spezifischen Leistung und der spezifischen Energie. Außerdem zeichnet sich LMO auch durch seine hohe Sicherheit aus. Nachteile besitzen die Lithium-Mangan-Spinelle im Bereich der Leistung und ihrer Lebensdauer. Diese Art der Zellchemie findet dennoch weite Verbreitung in aktuellen Fahrzeugen mit Elektroantrieb. Ein Beispiel hierfür sind der Chevrolet Volt und der Nissan Leaf.

#### **Lithium-Titanat (LTO)**

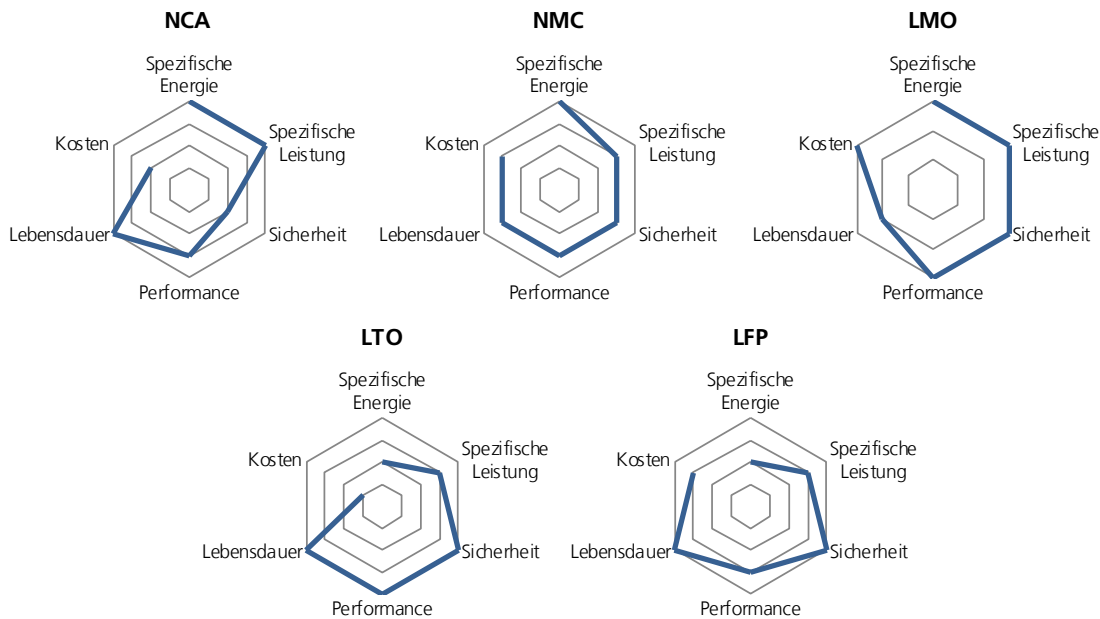
Das Lithium-Titanat ersetzt das Graphit in der Anode einer herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterie. LTO besitzt die chemische Formel  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  und wird aufgrund seines hohen Preises nur selten eingesetzt. Ein weiterer entscheidender Nachteil ist, dass aufgrund des stark negativen elektrochemischen Potentials des Materials (-1,55 V) die Spannung der Zelle erheblich sinkt (Kroll 2011).

#### **Lithium Iron Phosphate (LFP)**

LFP steht für die chemische Bezeichnung  $\text{LiFePO}_4$ . Diese Zellchemie wurde am Anfang der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien sehr häufig verwendet, da sie eine sehr lange Lebensdauer und ein sehr hohes Maß an Sicherheit besitzt. Außerdem sind die Leistung und die spez. Leistung hoch. Einzig im Bereich der spez. Energie schneidet diese Art der Chemie schlecht im Vergleich zu den Konkurrenten ab. Neben dem metallischen Lithium der Kathode sind hier die Stoffe Eisen, Phosphor und Sauerstoff enthalten. Abbildung 3.7 zeigt die Ergebnisse der Betrachtung der Boston Consulting Group für die vier benannten Zellchemien. Durch die Entwicklung neuer Zellchemien sind weitere Steigerungen der Leistungs- und Energiedichte möglich.

### 3.5.3 Hochenergiezellen und Hochleistungszellen

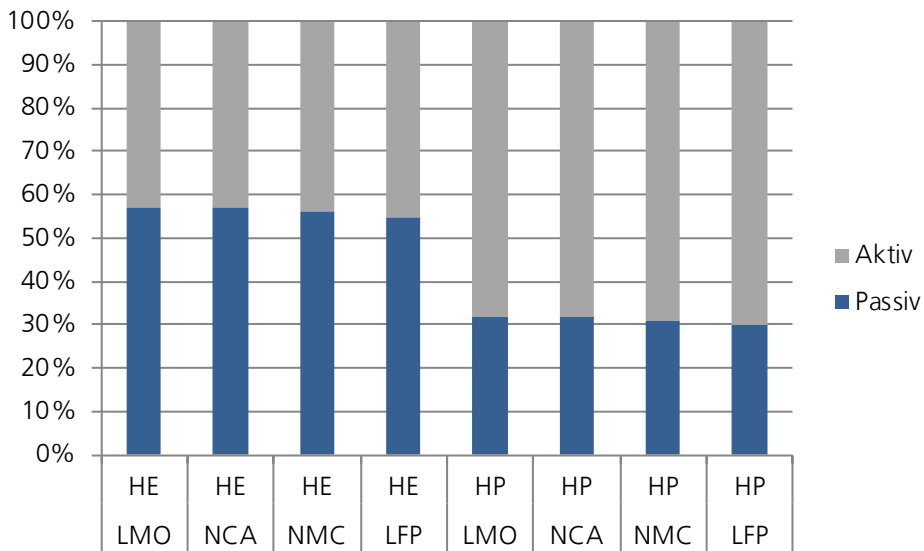
Die Hochenergiezellen sind darauf ausgelegt, möglichst viel elektrische Energie speichern zu können. Ziel ist also eine hohe Kapazität der einzelnen Zellen durch einen hohen Amperestunden Wert zu erreichen. Die Zelle ist so dimensioniert, dass sie über einen langen Zeitraum hinweg ihre elektrische Ladung abgeben kann. Die Hochleistungszellen sind im Gegensatz hierzu darauf ausgelegt über einen kurzen Zeitraum eine möglichst hohe Leistung abzugeben. Wichtig sind diese Zellen z. B. für Hybridfahrzeuge um kurzfristig, etwa bei einem Überholmanöver, den Verbrennungsmotor zu unterstützen und die maximal erreichbare Leistung zu generieren. Diese Zellen besitzen ein anderes Verhältnis der Aktiv- zu den Passivmaterialien als die Hochenergiezellen, welche vornehmlich in Elektrofahrzeugen Anwendung finden. Größter Unterschied zwischen der Hochenergie-Konfiguration (High Energy, HE) und der Hochleistungs-Konfiguration (High-Power, HP) besteht in der Schichtdicke des Kathodenmaterials. Während die Kathodendicke im Falle einer Hochenergie-Konfiguration 150  $\mu\text{m}$  beträgt ist sie bei einer Hochleistungs-Zelle nur 30  $\mu\text{m}$  stark (Mock 2010). Dies sorgt im Falle der Hochleistungszelle für einen schnelleren Ladungsaustausch und somit für eine höhere Leistung als bei der Hochenergie-Zelle, welche mit ihrer stärkeren Kathodenschicht eine kontinuierliche Leistungsabgabe über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Abbildung 3.8 zeigt, wie sich die Massen der Aktiv- und Passivmaterialien in den Hochenergie- und Hochleistungszellen unterscheiden.



**Abbildung 3.7: Eigenschaften der verschiedenen Zellchemien. Kriterien: Spezifische Energie, Spezifische Leistung, Sicherheit, Performance (Spitzenleistung bei niedrigen Temperaturen, Ladezustandsmessungen, Thermomanagement), Lebensdauer, Kosten.**

Quelle: BCG (2010).

Es ist deutlich zu erkennen, dass alle Zellchemien in der High Energy Konfiguration einen höheren Anteil an Aktivmaterialien als Passivmaterialien besitzen. Dieser Anteil schwankt zwischen den Zellchemien mit 55% bis 57%. Bei den selben Zellchemien als High Power Konfiguration sieht man allerdings nur einen Anteil der Aktivmaterialien zwischen 30% und 32%. Dieser Unterschied ist auf die stärkere Dimensionierung der High Power Zellen zurückzuführen. Sie sind darauf ausgelegt, eine deutlich geringere Kapazität als die Hochenergiezellen zu speichern, aber diese in einer sehr kurzen Zeit abzugeben. Teilweise wird in verschiedenen Quellen angegeben, dass sich einzelne Zellchemien nur für die Verwendung in einer Hochleistungszelle bzw. in einer Hochenergiezelle eignen. Diese Angaben unterscheiden sich bei verschiedenen Quellen allerdings deutlich. Es sind ausserdem widersprüchliche Aussagen zu finden. So wird z. B. angegeben, dass sich NMC und NCA jeweils für die Verwendung in beiden Konfigurationen eignen, aber LMO nur für die Verwendung in Hochleistungszellen und LFP nur für die Verwendung in Hochenergiezellen (Hug 2010). Andere Quellen zeigen, dass auch LMO eine hohe spez. Energie besitzt und auch LFP eine höhere spezifische Leistung als spezifische Energie besitzt. Somit ist es sehr schwer, den Zellchemien eindeutig eine Verwendung einzig für Hochleistungs- bzw. Hochenergiezellen zuzuordnen. Es ist vielmehr grundsätzlich möglich jede der Zellchemien in beiden Zellkonfigurationen, also für die Verwendung in Hochleistungs- bzw. Hochenergiezellen, zu nutzen. Dies muss jeweils mit den spezifischen Anforderungen abgestimmt werden.

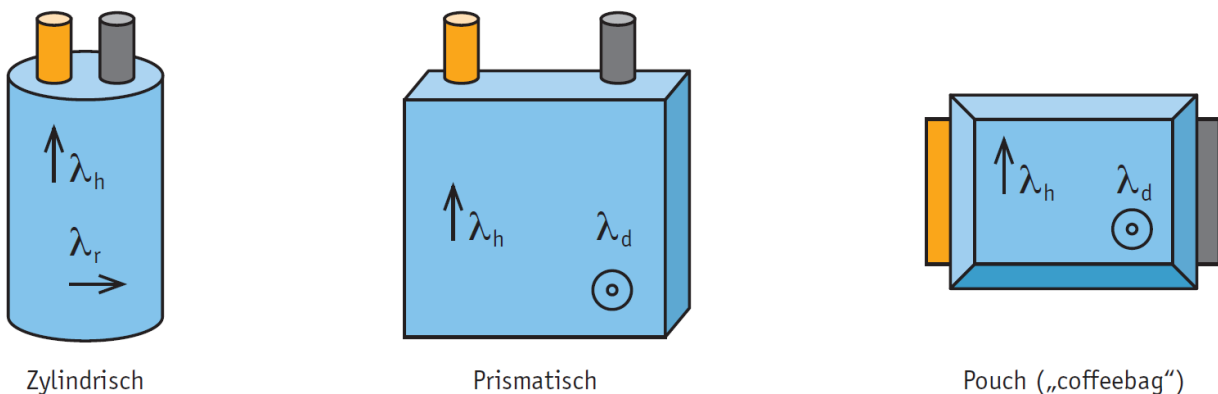


**Abbildung 3.8: Gewichtsanteile von Aktiv- und Passivmaterialien bei Hochenergie- (HE) und Hochleistungszellen (HP).**

Quelle: Kroll (2011).

### 3.5.4 Batteriesystem: Aufbau und Komponenten

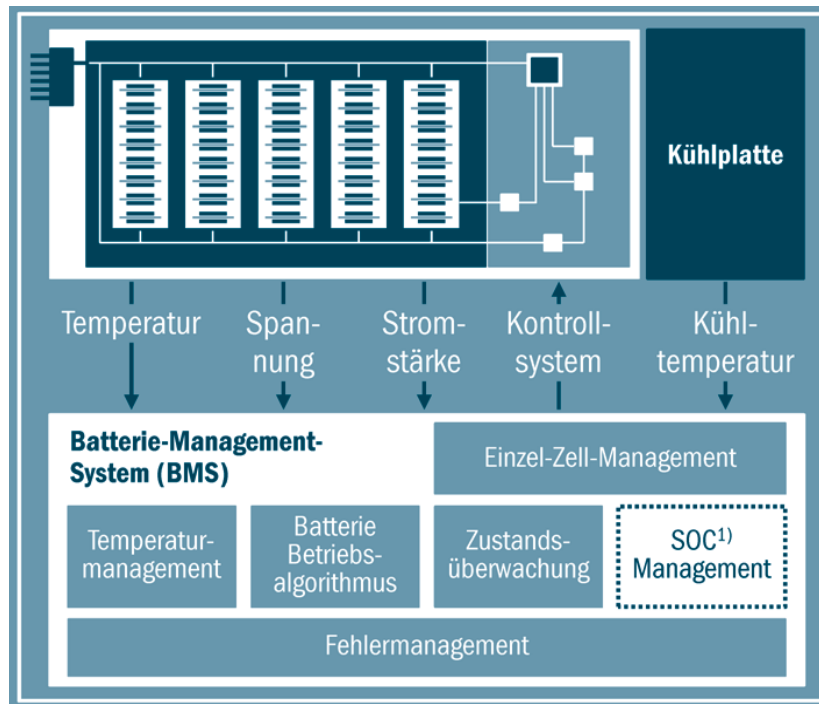
In Li-Ionen-Akkumulatoren werden unterschiedliche Materialien eingesetzt. Sie werden in verschiedenen Bauarten gefertigt: kleine Rundzellen, großformatige runde oder prismatische Zellen bis hin zu Pouch-Zellen. Letztere werden auch als Coffee-Bag oder Beutzelzellen bezeichnet. Zylindrische Zellen sind mechanisch stabil und somit sicherer. Pouch-Zellen besitzen hingegen eine höhere Packungsdichte und lassen sich einfacher temperieren. Zum mechanischen Schutz werden mehrere flexible Pouch-Zellen zu einem Modul zusammengefasst und in ein Gehäuse gesetzt.



**Abbildung 3.9: Zelltypen (richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ ).**

Bildquelle: Behr (2009).

Das Batteriesystem setzt sich zusammen aus dem Batteriepack, der Batterie-Temperierung und dem Batterie-Management-System (BMS). Das Batteriepack setzt sich wiederum aus mehreren Batteriemodulen und diese wiederum aus Einzel-Zellen zusammen, welche in Reihe und/oder parallel verschaltet sind. Verschiedene Konzepte zur Li-Ionen-Batterie-Temperierung sind denkbar (Luft- bzw. Flüssigkühlung). Das Batteriemangement hat die Aufgabe, Spannungen, Ströme, Temperaturen sowie Ladezustände der Einzel-Zellen zu überwachen, zu regeln und Fehler zu erkennen bzw. zu vermeiden.



**Abbildung 3.10: Batterie: Aufbau und Komponenten.**

Quelle: Schlick et al. (2011).

### 3.5.5 Fertigungsschritte der Zellen-, Modul- und Pack-Herstellung

Im Folgenden wird auf die Fertigungsschritte der Zellen-, Modul- und Pack-Herstellung eingegangen.

#### 3.5.5.1 Zellen-Herstellung

Die Zelle ist die kleinste Einheit der Batterie. Dennoch ist Ihre Herstellung am schwierigsten. Es sind Spezialmaschinen erforderlich, die bisher noch nicht in großindustrieller Herstellung verwendet werden. Die Zellherstellung beginnt mit der Herstellung der Elektroden. Hierzu müssen die verschiedenen Chemikalien der Kathode in einem Mischer homogenisiert werden. Die Herausforderung in diesem Produktionsschritt besteht in der Sicherstellung der Reproduzierbarkeit des Mischungsverhältnisses. Dies ist sehr wichtig, um gleichbleibende Eigenschaften der Batteriezellen sicherzustellen. In diesem Fertigungsschritt werden außerdem weitere chemische Substanzen wie Binder, Anodenmaterialien und der Elektrolyt angeliefert. Der zweite große Produktionsschritt wird, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, als „Beschichtung“ bzw. „Coating“ (2.) bezeichnet. An dieser Stelle findet das Auftragen der gemischten Kathodenmaterialien auf die Elektrodenfolien statt. Auch hier ist ein sehr hohes Maß an Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der



Beschichtung für die Qualität der Zelle essentiell. Die Dicke der Beschichtung der Elektrodenfolien ist das Hauptkriterium für deren Konfiguration als Hochleistungszellen und Hochenergiezellen. Nach der Trocknung (3.) der Elektrodenfolien beginnt der Fertigungsschritt des Kalanderns. Hierbei wird eine einheitliche Schichtdicke der Elektrodenfolien hergestellt. Das Schneiden der kontinuierlichen Folie bildet den letzten Schritt der sich rein mit der Herstellung der Elektroden beschäftigt. Danach findet die Zusammensetzung der Zellen statt. Nach der Befüllung mit dem Elektrolyt kann der Einbau in ein Gehäuse, das Casing, erfolgen. Die Zelle wird mit Aluminium-Folie umschlossen. Diese Fertigungsschritte müssen in einem Trockenraum stattfinden, um eine sehr niedrige Luftfeuchtigkeit im Produktionsprozess zu gewährleisten. Das Innere eines Lithium-Ionen-Akkumulators ist vollkommen wasserfrei, an etwaigen Beschädigungen eindringendes Wasser reagiert unter starker Wärmeentwicklung mit Verpuffungs- und Brandgefahr. Nun erfolgt das Laden der Zellen. In einem letzten Fertigungsschritt werden dann die Zellen getestet. Für nahezu jeden der Produktionsschritte in der Zellenherstellung werden Sondermaschinen verwendet. Diese sind speziell auf die Batteriefertigung zugeschnitten und befinden sich bisher noch in keinem verbreiteten Großserieneinsatz.



**Abbildung 3.11: Fertigungsschritte Zellherstellung.**

Quelle: Kroll (2011).

### 3.5.5.2 Modul-Herstellung

Nach abgeschlossener Fertigung werden die Zellen der Modulherstellung zugeführt. Die Zellen werden zunächst übernommen und in einem zweiten Fertigungsschritt einer genauen Inspektion unterzogen. Damit soll sichergestellt werden, dass nicht schon defekte Zellen weiter zum Modul verarbeitet werden. Im nächsten Fertigungsschritt werden die Zellen, ihre elektrischen Verbindungen untereinander und eine Reihe von Sicherheitsbauteilen wie Balancer, ein Überdruckventil und die Isolierung gestapelt. Der Balancer sorgt später im Modul dafür, dass die Batteriezellen alle gleichmäßig geladen bzw. entladen werden. Er ist ein wichtiges Bauteil und sorgt für eine hohe Lebensdauer des Batterie-Moduls. Ein Überdruckventil wird im Modul benötigt, da die einzelnen Pouch-Zellen keine solchen Ventile besitzen. In den folgenden Schritten werden analog Abbildung 3.12 der Kühlmittleinlass/-Auslass, die Zellüberwachung und die elektrischen Verbindungen montiert. Im Anschluss findet die Integration ins Submodul statt. Danach werden die mechanischen Verbindungen und die „Coverplate“, eine Art Schutzplatte des Gesamtgehäuses montiert. Den Abschluss der Modulherstellung bildet der Test der Module. Für die gesamte Modulherstellung wird v. a. Automatisierungstechnik in Form von Montage-Robotern angewendet. Für die Inspektion der Zellen und für den finalen Modultest werden spezielle Batterie-Test- und Ladegeräte verwendet.



**Abbildung 3.12: Fertigungsschritte Modulherstellung.**

Quelle: Kroll (2011).

### 3.5.5.3 Pack-Herstellung

Bei der Herstellung des Batterie-Packs kommt, ähnlich wie bei der Modul-Herstellung, fast ausschließlich Automatisierungstechnik zum Einsatz. Spezialgeräte werden allerdings für die Aufladung der Module und für den elektrischen Test benötigt. Abbildung 3.13 zeigt die notwendigen Fertigungsschritte detailliert auf. Die Fertigungsschritte, welche die Montage von verschiedenen Bauteilen beinhalten, nutzen Automatisierungstechnik in Form von Montage-Robotern. Diese sind großindustriell in nahezu jeder verarbeitenden Industrie vertreten. Es werden die einzelnen Moduleinheiten zusammen mit der Steuerungselektronik, Kühlungsverbindungen und dem Batterie-Management-System im Gesamtgehäuse zu dem Batterie-Pack zusammengesetzt.

### 3.5.6 Wertschöpfung in Deutschland

Zur Integration des Zell-Stapels in das Batteriesystem (Packaging, Kühlung etc.) ist bereits Know-how in Deutschland vorhanden, zur Herstellung von Einzel-Zellen jedoch kaum. Dies ist insofern bedenklich, als dass ein großer Teil der Wertschöpfung und Kosten elektrifizierter Fahrzeugantriebe auf die Produktion der Einzel-Zellen entfällt. Die Automobilhersteller verfolgen dabei verschiedene Strategien. Sie stellen entweder über Joint Ventures (JV) selbst die Zellen her oder lassen diese von Zulieferern fertigen (Schlick et al. 2011). Der Automobilhersteller Daimler fertigt in seinem JV mit Evonik unter dem Namen LiTec seine Einzel-Zellen in Deutschland selbst. Der Automobilzulieferer Bosch hat hierzu ein JV mit Samsung gegründet (SB LiMotive), doch werden die Einzel-Zellen bei Samsung in Südkorea produziert. Volkswagen lässt die Zellen von seinem strategischen Partner Sanyo liefern (Schlick et al. 2011). Deutsche mittelständische Hersteller von Starterbatterien (z. B. Hoppecke oder Moll) werden nach heutiger Einschätzung finanziell nicht in der Lage

sein, eigenständig Zellen zu entwickeln und zu fertigen (Dudenhöffer 2010). Li-Ionen-Zellen befinden sich noch in einer frühen Phase der Entwicklung, weshalb noch viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl auf Materialebene als auch auf Produktionsebene erforderlich ist. Die staatliche Förderung leistet an dieser Stelle einen wichtigen Beitrag, muss allerdings nach Meinung von Experten, auch aus dem Kreise der Workshopteilnehmer, weiterhin ausgebaut werden (Tillmetz 2008; BMBF 2010).



**Abbildung 3.13: Fertigungsschritte Packherstellung.**

Quelle: Kroll (2011).

Für die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung von Einzel-Zellen sind bereits deutsche Unternehmen mit entsprechendem Know-how vorhanden (Abbildung 3.14). Allerdings haben diese Firmen bisher noch kaum Kontakt zur Automobilindustrie. Spezielle Projekte führen die entsprechenden Firmen zusammen und leisten somit einen wertvollen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie (BMBF 2010).

Der Rohstoff Lithium muss aus dem Ausland importiert werden, ebenso wertvolle Metalle für Zellchemie bzw. Elektroden, weshalb auch Recyclingtechnologien und -anlagen zu entwickeln sind. Vor dem Schritt der materiellen Wiederverwertung können Batterien, die für den automobilen Bereich nicht mehr tauglich sind, für stationäre Anwendungen eingesetzt werden. Strategien zur Verbesserung der Ausnutzungsgrade und für Sekundärmaterialien können für die Wertschöpfungsketten im regionalen Kompetenznetzwerk Impulse liefern.

Prozessschritt	Mischen	Beschichten	Kalandern	Schneiden	Trocknen	Fügen/ Verpacken <sup>2)</sup>	Befüllen/ Versiegeln	Formieren/ Prüfen
<b>Deutsche Anbieter (Auswahl)</b>	> Eirich > Lödige	> Coatema > O.m.t. > Kroenert > Dr. Collin	> Saueressig > Dr. Collin	> Manz Automation > Duerr	> Manz Automation > Duerr	> Manz Automation > Duerr	> Manz Automation > Duerr > CMW Automation	> Manz Automation > Duerr > Digatron > Benning > Bosch

**Abbildung 3.14: Prozessschritte und deutsche Anbieter.**

Quelle: Schlick et al. (2011).

### 3.5.7 Batterie-Kosten

Aktuell sind die Kosten für eine Lithium-Ionen-Traktionsbatterie noch sehr hoch. In der Literatur werden die Kosten einer Traktionsbatterie für Elektrofahrzeuge mit \$15.000 bis \$30.000 angegeben. Bei einer Kapazität von 20 bis 40 kWh errechnen sich die Kosten pro kWh auf etwa \$750. Für einen Plug-In-Hybridfahrzeuge werden etwa \$1.100 pro kWh angegeben, was bei 5 bis 15 kWh einem Batterie-Preis von \$10.000 bis \$12.000 entspricht (Buchmann 2009). Die Batterie eines Hybridfahrzeugs wird mit \$1.500 pro kWh angegeben. Aufgrund ihrer geringen Kathodendicke, welche ja nach Leistungsanforderung an die Batterien physikalisch beschränkt ist, sind Batterien für Hybridfahrzeug im Allgemeinen pro kWh deutlich teurer als Hochenergiebatterien für (überwiegend) elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Die Batteriekosten für ein Hybridfahrzeug betragen etwa \$2.000 bis \$3.000 (Buchmann 2009). Wenn man einen Euro-Dollar-Wechselkurs von \$1,40 zugrunde legt, liegen die Batteriekosten aktuell zwischen 536 € (EV) und 1071 € (HEV) pro kWh Batteriekapazität (Stand 2011). Diese enormen Batteriekosten treiben die Anschaffungskosten für Fahrzeuge mit elektrifiziertem Antriebsstrang stark in die Höhe. Um die ambitionierten Ziele der Bundesregierung Deutschlands, aber auch der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika, jeweils eine Million Elektrofahrzeuge bis 2020 bzw. schon 2015 auf die Straßen zu bringen (Die Bundesregierung 2009) (DOE 2011), ist es nötig, die Kosten allgemein und insbesondere der Batterien stark zu senken. Vom United States Advanced Battery Consortium (USABC) wurden Kostenziele für die Verkaufspreise des Batterieproduzenten an die Automobilindustrie von 200 bis 300 US\$/kWh vorgegeben (Anderson et al. 2009; Ketterer et al. 2009). Das bedeutet, dass sich die Kosten für Traktionsbatterien um ca. 80% reduzieren müssen, um die Kostenziele der USABC erreichen zu können. Dies lässt sich durch ein sehr hohes Produktionsvolumen und damit einhergehenden Lern- und Skaleneffekten in der Produktion erreichen.

### 3.5.8 Sicherheit

Die Sicherheit der Lithium-Ionen Traktionsbatterien spielt für die Entwicklung der Elektromobilität eine entscheidende Rolle. In seltenen Fällen kam es im Bereich der Kleinelektronik zu Unfällen mit brennenden oder explodierten Akkus. Auch während Batterietests für Elektrofahrzeuge kam es schon zu teilweise Bränden, allerdings handelte es sich hierbei um Einzelfälle während der Erprobungen. Dennoch kam es durch die Berichterstattung der Medien und das allgemeine Interesse zu Sicherheitsbedenken bei der Lithium-Ionen Technologie. Eine große Gefahr geht hierbei von dem brennbaren Elektrolyten aus. Wenn es zu einem Kurzschluss in der Zelle kommt, könnte hierdurch ein Batterie-Brand ausgelöst werden. Aus diesem Grund ist es nötig, Sicherheitsbauteile im Batterie-Pack zu integrieren. Dies beginnt in der Zelle mit einem sicheren Anoden- und Kathodenmaterial, einem leistungsfähigen Separator und einer dichten Hülle aus Aluminiumfolie. Im Bereich des Moduls werden zusätzlich verschiedene Sicherheitsbauteile verbaut. Hierzu

zählen ein Überdruckventil, ein stabiles sicheres Gehäuse sowie der Balancer. Dieser sorgt aktiv für eine ausgeglichene Ladung jeder einzelnen Batteriezelle während des Lade- und Entlade-Vorgangs und sorgt somit dafür, dass es nicht zur übermäßigen Belastung einer einzelnen Zelle und dadurch eventuell zu einem Defekt oder Kurzschluss kommt. Das Batterie-Pack besitzt als Sicherheitsbauteile ein stabiles Gehäuse, meist aus Stahl oder Aluminium, eine Isolierung und ein Batterie-Management-System, welches zusammen mit dem Balancer die Ladung und Entladung der Batterie koordiniert. Häufig findet auch ein thermisches Management der Batterie-Zellen statt. Durch dieses Management wird gewährleistet, dass die Batterie-Zellen immer im optimalen Temperaturbereich arbeiten und die Lebensdauer sich nicht aufgrund einer Überhitzung signifikant verkürzt.

Weiterer Fokus liegt auf der Produktionstechnologie. Eine hohe Sicherheit kann nur gewährleistet werden, wenn die Produktion sehr genau und reproduzierbar arbeitet. Den hohen Stellenwert der Sicherheit hat auch die Bundesregierung in ihrem „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ erkannt: „Notwendig für eine breite Einführung von Elektrofahrzeugen in den kommenden Jahren ist die Schaffung einer Reihe von politischen, regulatorischen, technischen und infrastrukturellen Voraussetzungen. So müssen z. B. zur Gewährleistung von Interoperabilität, Sicherheit und Akzeptanz offene europäische Standards geschaffen werden, die global hohe Maßstäbe setzen.“ (Die Bundesregierung, 2009).

### 3.5.9 Entwicklungspotential bei Batterien

Nach Ansicht der Workshopteilnehmer ist es im Hinblick auf die Entwicklung der nationalen Batterietechnologie entscheidend, von der asiatischen Batterieindustrie zu profitieren und durch eine Intensivierung des Forschungsanstrengungen gezielte Entwicklungsfortschritte zu beschleunigen. Auch muss die Wertschöpfungskette in Deutschland ergänzt bzw. geschlossen werden. So sollte auch die Produktion von Einzelzellen durchgängig in Deutschland erfolgen.

Mit dem Ziel der Gewichts- und Bauraumreduktion kann der Akkumulator in die Fahrzeugstruktur modular verteilt und integriert werden. Aus Sicherheitsgründen darf jedoch im Crashfall der Akkumulator nicht beschädigt werden. Tiefergehende Forschungsaktivitäten sind hierzu erforderlich, Forschungskompetenzen gerade in Baden-Württemberg sind dafür prädestiniert.

Da Bleibatterien sehr preisgünstig sind und sich für den Einsatz in Micro-Hybriden mit Start-Stopp-Automatik sehr gut eignen gilt es, auch diese Akkumulator-Technologie weiterzuentwickeln. Hierzu ist die Entwicklung neuer Analyse- und Diagnoseverfahren erforderlich.

Für die Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind Fortschritte auf den Gebieten Sicherheit, Recyclingfähigkeit und Kostenreduktion zu erzielen. Zur Kostenreduktion durch Skaleneffekte sind spezielle Anlagen zur Serienfertigung und Sondermaschinen zu entwickeln. Zudem muss der Grad der Automatisierung z. B. durch den Einsatz von Montagrobotern vorangetrieben werden.

Lithium-Ionen Batterien besitzen ein hohes Maß an Entwicklungspotential. So sind Zellchemien bekannt, welche es ermöglichen, eine noch höhere Energie- und Leistungsdichte zu erzielen. Während heutige Lithium-Ionen-Zellen maximal eine Energiedichte bis etwa 250 Wh/kg erreichen, haben Lithium-Schwefel-Zellen das Potential eine Energiedichte zwischen 300 und 400 Wh/kg zu erreichen (Horst, 2011). Andere Quellen geben hier sogar 550 Wh/kg an (Buchmann 2009). Diese Akkumulatoren besitzen eine Anode aus Lithium-Metall und eine Kathode aus Schwefel. Hiermit ist eine theoretische Energiedichte von 2500 Wh/kg möglich (Buchmann 2009; Thielmann et al. 2010). Des Weiteren haben Lithium-Schwefel-Batterien sehr gute Entlade-Eigenschaften bei tiefen Temperaturen. Nachteilig ist die geringe Zellspannung von nur 2,1 V (Vergleich Li-Ion ca. 3,7 V). Problematisch ist aktuell auch noch die geringe Lebensdauer von nur 40 bis 50 Lade-/Entlade-Zyklen (Buchmann 2009).

Ein weiterer Forschungsbereich ist der Lithium-Luft-Akkumulator. Es wird davon ausgegangen, dass diese Art der Batterie nach dem Jahre 2030 einsatzbereit für die Nutzung als Traktionsbatterie ist (Thielmann et al. 2010). Diese Entwicklung stammt von IBM, als Anode dient weiterhin metallisches Lithium, die Kathode allerdings wird durch Luft ersetzt. Die theoretisch erreichbare Energiedichte aus dieser Materialpaarung liegt bei etwa 11.000 Wh/kg (Visco et al. 2009). Die kommerziell erreichbare Energiedichte liegt bei etwa 1000 Wh/kg (Visco et al. 2009). Die gute Hitzebeständigkeit dieser Technologie ist ein wesentlicher Vorteil.

Die Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Technologie haben aufgrund ihrer spezifischen Vorteile eine gute Chance, die Lithium-Ionen-Technologie abzulösen. Dies wird allerdings noch sehr viel Zeit und Entwicklungsarbeit erfordern. Somit ist nicht vor 2020 mit einer kommerziellen Anwendung dieser Technologien zu rechnen.

### 3.6 Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Speicher

Die Anwendungen der Brennstoffzelle als Wandler chemischer Energie in elektrische und Wärmeenergie umfasst ein breites Spektrum. Dies ist hauptsächlich dem hohen Wirkungsgrad und der guten ökologischen Verträglichkeit der Brennstoffzellen geschuldet, da bei Verwendung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff keine klimaschädlichen bzw. gesundheitsschädlichen Stoffe entstehen. Dies gilt sowohl, für den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie als direkter Energiewandler, wie z. B. bei Langstreckenfahrzeugen, als auch für die Verwendung als Range-Extender. Für beide Anwendungen ist diese Technologie prädestiniert die Herausforderungen der Reichweite und der Betankungszeiten, kombiniert mit Effizienz und ökologischer Verträglichkeit, aufzunehmen und zu bewältigen. Der Einsatz der Brennstoffzellentechnik ist jedoch gemeinsam mit der Thematik der Wasserstoffversorgung und -speicherung zu betrachten. Ohne eine funktionierende Wasserstoffinfrastruktur und -speicherung müsste man bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen auf Konzepte mit einer On-Board Wasserstoffherstellung über Reformier (Benzin, Diesel, Methanolreformer) oder mit Direkt Methanol Systemen zurückgegriffen werden. Diese Konzepte sind aus heutiger Sicht aber nicht zukunftsdominant und daher hier nicht weiter berücksichtigt.

Wie in Kapitel 6 dargestellt wird, werden in Zukunft mehr Fahrzeuge mit Hybrid- und Range-Extender-Konzepten zum Einsatz kommen (Abbildung 6.3). Hieraus ergibt sich ein steigender Forschungsbedarf auf diesem Gebiet. Im Speziellen werden Elektrofahrzeuge mit Range-Extendern als Enabler der Elektromobilität verstanden, um die Reichweitenverlängerung rein batteriebetriebener Fahrzeuge aufzubrechen, vor allem, wenn weitere Entwicklungsaspekte, wie z. B. die Wasserstoffspeicherung on Board und die Bereitstellung der dazu erforderlichen Versorgungsinfrastruktur vorangetrieben werden. Verschiedene technische Lösungen sind denkbar und in Ansätzen bereits dargestellt. Sie können unter Berücksichtigung von in Baden-Württemberg vorhandenem Knowhow erforscht und weiterentwickelt werden.

Die im Folgenden aufgelisteten Eigenschaften sind ein Ausschnitt des Aufwandes, der noch betrieben werden muss. Die Förderung und Entwicklungsfortschritte in den einzelnen Anwendungsbereichen und Technologien weisen Synergieeffekte auch in anderen Bereichen auf und führen zu Verbesserungen der Markteinführung dieser umweltfreundlichen und energiewirtschaftlich relevanten Technologien als Ganzes.

### 3.6.1 State-of-the-Art

Für die Analyse der potentiellen Automobilkomponenten zukünftiger elektrifizierter Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystemen und derer Wertschöpfungsketten werden einleitend die Brennstoffzellentechnologien, das Funktionsprinzip, die Bauteile und Komponenten des Aufbaus der Brennstoffzelle und des Stapels aufgezeigt und das Brennstoffzellensystem mit den entsprechenden Subsystemen und Baugruppen inklusive der Wasserstoffspeicherung beschrieben.

#### 3.6.1.1 Brennstoffzellentechnologien

Derzeit verfügbare Brennstoffzellentechnologien sind:

##### **AFC**

Die AFC (Alkaline Fuel Cell) weist mitunter den höchsten Wirkungsgrad von bis zu 70% für den Stapel (engl. Stack) und bis zu 60% als Systemwirkungsgrad auf, benötigt allerdings hochreinen Wasserstoff und Sauerstoff für den Betrieb, da bei einem CO<sub>2</sub>-Anteil im Brennstoff Kaliumkarbonat ausfällt. Auch wenn dieses System kostengünstig herstellbar ist, da zur Herstellung sehr preiswerte Materialien wie Raney-Nickel als Katalysatoren und sonst nur Kunststoffe verbaut werden, ist für den automobilen Einsatz dieses System auf Grund der Degradationsprobleme bei CO<sub>2</sub> Verunreinigung und dem damit verbundenem Blockieren der Poren durch Kaliumkarbonat eher ungeeignet. Daher wurde in der EU die Entwicklung im Wesentlichen eingestellt.

##### **PEFC**

Die PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell) ist mittels festen Elektrolyts als Membran (Polymer Electrolyte Membran – PEM) aufgebaut (vgl. Abbildung 3.19). Mit diesem Brennstoffzellen-Typ sind ähnlich hohe Wirkungsgrade wie mit der AFC, d. h. bis knapp 70%, erzielbar. Auch die Systemwirkungsgrade mit bis zu 60% sind mit denen der AFC vergleichbar. Die PEFC-Stapel werden aus Graphit, Metall oder leitfähigen Composite-Materialien gefertigt. Als Katalysatoren kommen Platin oder Platin/Ruthenium zum Einsatz. Diese Katalysatoren sind zwar CO-empfindlich aber CO<sub>2</sub>-tolerant. Durch die Katalysatorvergiftung mit CO erfolgt eine Degradation der Brennstoffzellen. Brennstoffe mit einer maximalen CO-Konzentration von 10-20 ppm sind jedoch, je nach verwendeten Katalysatoren, für diesen Brennstoffzelle Typ verträglich.

Aufgrund dieser Eigenschaften, der Schnellstartfähigkeit und einer guten Dynamik, ist die PEFC für den Einsatz im automobilen Bereich besonders prädestiniert. Im Bereich der PEFC-Technologie erfolgen derzeit die meisten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Einige der Forschungsschwerpunkte sind: Hochtemperatur-PEFC<sup>3</sup>, Niederdrucksystem, Reduktion des Eigenenergiebedarfs, wasserfreie Membranen (keine Kaltstartproblematik, keine Befeuchtung, kein Wassermanagement), Leistungselektronik, Reduktion der Platinbelegung u.a.

##### **DMFC**

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) werden direkt mit Methanol betrieben. Der Vorteil des flüssigen Brennstoffs Methanol ist der Wegfall der Speicherproblematik, was diesen Brennstoffzellentyp besonders für den Einsatz im Fahrzeug qualifiziert. Dieser Vorteil der DMFC wiederum verursacht bei den heutigen im Einsatz befindlichen Membranen durch die Methanolpermeation eine Blockierung der Kathoden-Katalysatoren. Dies führt wiederum zu geringeren Wirkungsgraden. Bezugnehmend auf diese Problematik leitet sich dar-

---

<sup>3</sup> Die Hochtemperatur-PEFC-Brennstoffzelle arbeitet im Temperaturbereich von 120° bis 200°C, z. B. mit PBI (Polybenzimidazol) als Membranmaterial – Fa. PEMEAS, Celanese. Höhere Temperaturen bedeuten eine Verbesserung des Wirkungsgrades, Vereinfachung des Wärmemanagements und eine Verringerung der CO-Empfindlichkeit der Katalysatoren.



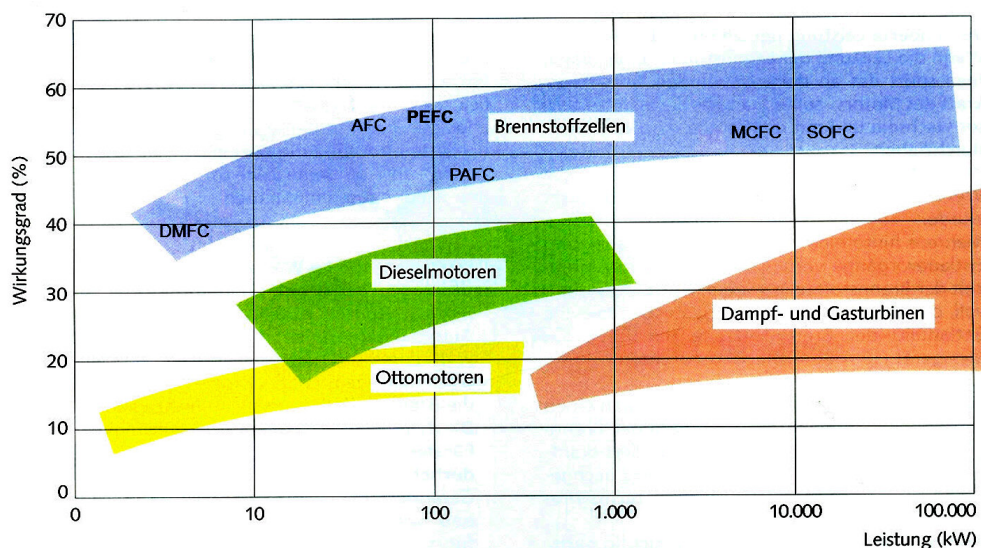
aus auch die Hauptforschungsrichtung ab. Die wesentlichen Arbeiten zielen auf die Entwicklung einer für Methanol undurchlässigen Membran und der Entwicklung von methanolresistenten Kathodenkatalysatoren. Dieser Brennstoffzellentyp wird in der Studie nicht berücksichtigt, da derzeit nur Systeme bis ca. 5 kW realisiert sind.

### PAFC

Der größte Vorteil der PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) ist die CO<sub>2</sub>-Unempfindlichkeit, da dieser Brennstoffzellentyp Säure als Elektrolyt verwendet. Die derzeit erzielbaren Wirkungsgrade mit ca. 35% bis 55% für die Stapel und bis zu 45% für das System sind im Vergleich zu den PEFC und AFC Technologien relativ niedrig. Daher wird dieser Brennstoffzellentyp hauptsächlich für den stationären Einsatz betrachtet. Zudem ist die Markteinführung ungewiss, da derzeit keine Kostenreduktion in Aussicht steht. Daher wird auch dieser Brennstoffzellentyp in unserer Bewertung nicht berücksichtigt.

### MCFC

Die MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) kann auch kohlendioxidhaltige Gase umsetzen und besteht aus günstigen Materialien (keine Edelmetalle, wie beispielsweise Platin). Aufgrund des flüssigen Elektrolyts, der als Karbonatschmelze bei 650°C gehalten werden muss, ist dieses System relativ aufwendig und daher für den automobilen Einsatz nicht geeignet. Auch für den stationären Bereich wurden die meisten Aktivitäten eingestellt. Dieser Brennstoffzellentyp findet daher keine Betrachtung in dieser Studie.



**Abbildung 3.15: Vergleich der Wirkungsgradbereiche von Kreisprozessen und offenen elektrochemischen Prozessen.**

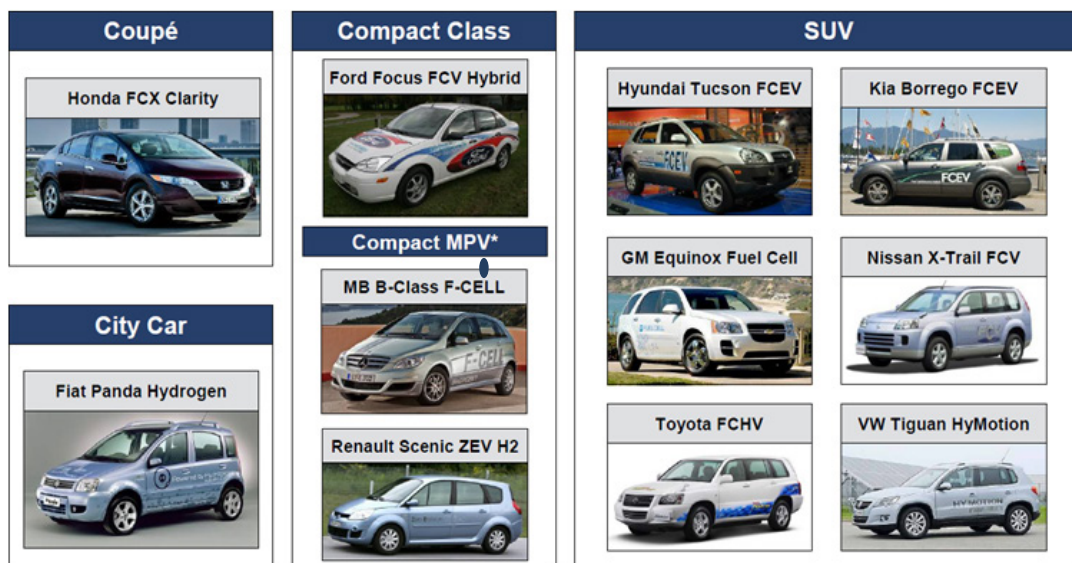
Quelle: DLR.

### SOFC

Die SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) weist zwar eine hohe Toleranz bei Brennstoffverunreinigung auf und kann außer Wasserstoff auch mit anderen Brennstoffen wie Erdgas, Biogas oder Kohlendioxid, wenn auch bei geringeren Wirkungsgraden, betrieben werden, arbeitet aber bei sehr hohen Temperaturen von ca. 800 bis 1000°C. Die Probleme der SOFC und damit die Entwicklungsaufgaben liegen primär in der hohen Temperatur begründet. Diese ist für die Leitfähigkeit des Sauerstoffionen Voraussetzung. Daher sind die Materialforschung zur Stabilität des Keramikelektrolyts und die Ausdehnungsanpassung bei der thermischen Zyklisierung und den damit einhergehenden Problemen der Dichtung die Herausforderungen dieser Technologie. Besonders aufgrund der vielseitigeren Kraftstoffverträglichkeit wurden Versuche, die SOFC im

automobilen Einsatz zu verwenden, unternommen. Die erforderlichen hohen Temperaturen stellen eine große Herausforderung an die Isolierung dar und führen zusätzlich zu langen Aufheizzeiten. Auch der Keramikelektrolyt, der extrem dünn ausgeführt sein muss, ist zerbrechlich und daher erschütterungsempfindlich, so dass diese Technologie, trotz einiger Versuche, sie als Range-extender zu etablieren, sich bis heute im Fahrzeug nicht durchsetzte und in unserer Bewertung daher nicht betrachtet wird.

Aus heutiger Sicht ist von den oben beschriebenen Brennstoffzellentechnologien anhand der Analyse der aufgeführten Vor- und Nachteile, die PEFC die aussichtsreichste Brennstoffzellentechnologie für den automobilen Einsatz. Die meisten derzeit realisierten Fahrzeuge beruhen auf dieser Technologie (Abbildung 3.16).



**Abbildung 3.16: Exemplarische Beispiele der Vertreter von PEFC-Fahrzeugen für unterschiedliche Fahrzeugklassen.**

Quelle: Herstellerangaben.

Entwicklungsperspektiven und Lösungsansätze der Brennstoffzellentechnik in Fahrzeugen auf den Weg zur wirtschaftlichen Umsetzung der bisher entwickelten und demonstrierten Technologien sind bereits gegeben. Zur Seriumsetzung der Technologien sind in der ganzen Bandbreite von der Materialentwicklung bis zur Wasserstoffherzeugung und -versorgung noch eine Reihe Konzept- und Detailarbeiten zu leisten, damit Serienfahrzeuge Realität werden können. Abbildung 3.17 zeigt stellvertretend am Beispiel der Daimler Brennstoffzellenfahrzeugentwicklung die derzeitigen Entwicklungsphasen der Brennstofffahrzeuge.

Die machbaren Entwicklungssprünge in dieser, für die Fahrzeugindustrie noch jungen Technologie, können am Beispiel der Weiterentwicklung des Brennstoffzellensystems von der A zu B-Klasse des F-Cells veranschaulicht werden. Durch Innovationen, Forschung und kontinuierliche Weiterentwicklung war es möglich, bei gleichzeitiger Leistungserhöhung um 30% eine Verbrauchsminderung um 16% sowie eine Erhöhung der Reichweite um 150% bei gleichzeitiger 40%-tiger Verkleinerung des Platzbedarfs des Systems zu erreichen. Dies veranschaulicht, dass diese Technologie noch am Beginn der Lernkurve ist und signifikantes Potential für Produktivitätssteigerungen bietet.



Abbildung 3.17: Entwicklungsphasen in der Evolution von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Quelle: nach Daimler.

### 3.6.1.2 Die PEFC-Brennstoffzelle

#### Das Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle ist die elektrochemische Energiewandlung. Hierbei wird die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie und Wärmeenergie umgesetzt. Bei der PEFC ist der Energieträger Wasserstoff, der Umwandlungsprozess entspricht der elektrochemische Reaktion <1>



Durch einen funktionsgerechten Aufbau erfolgen in der Brennstoffzelle die Teilreaktionen an der Anode <2> und an der Kathode <3> (Abbildung 3.18).

Anodenreaktion:



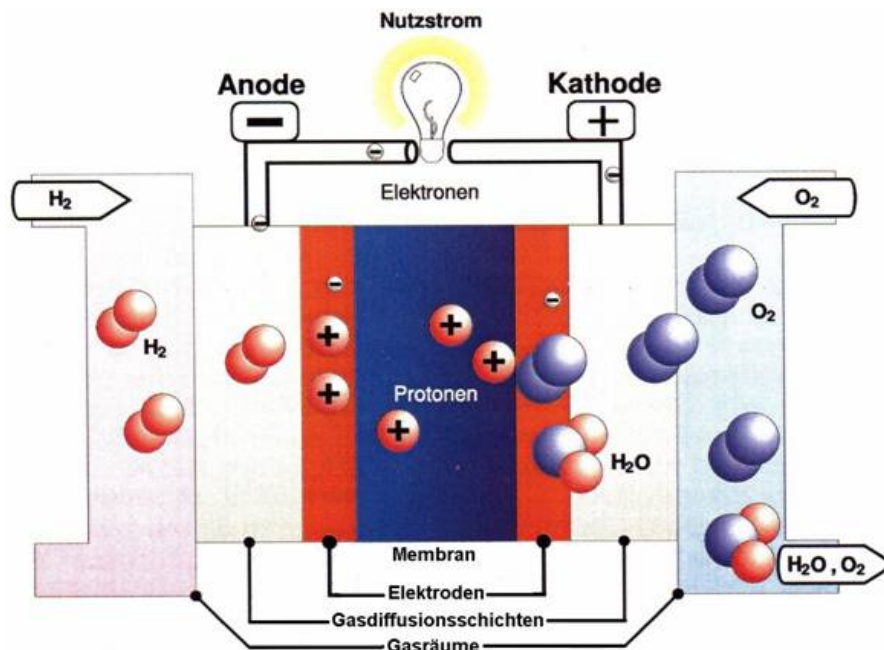
Kathodenreaktion:



Durch die Trennung des Transports von Protonen durch die Membran und der Elektronen über eine elektrische Verbindung mithilfe der Membran-Elektroden-Einheit erfolgt die Reaktion <1> kontrolliert und die elektrische Energie kann auf einem geregelten Weg genutzt werden.

#### Aufbau einer Brennstoffzelle

Eine Basis-Brennstoffzelle besteht aus nur fünf Teilen: zwei Gehäusehälften, einer Membran-Elektroden-Einheit (EME) (im Englischen: MEA – Membrane Electrode Assembly) und zwei Gasdiffusionsschichten (Abbildung 3.18).



**Abbildung 3.18: Funktionsprinzip der Brennstoffzelle.**

Quelle: DLR.

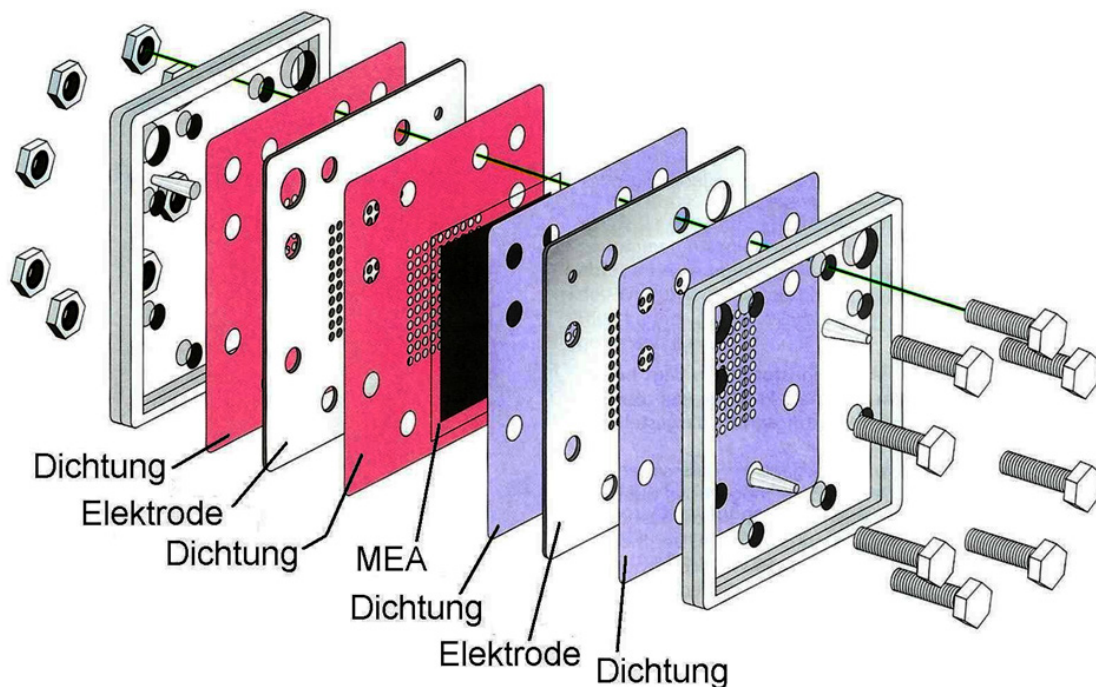
Mittels der gasdichten Gehäusehälften mit separaten Gaszu- und -abläufen werden getrennte Gasräume gebildet (vgl. Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19). Zwischen den beiden Gasräumen befindet sich die gasdichte Membran, die im Falle der PEFC einen protonenleitenden Elektrolyten enthält auf den zwei katalytisch wirksamen Elektroden, Anode und Kathode, aufgebracht sind. Die beiden Elektroden sind gasdurchlässige, elektrisch leitfähige Diffusionsschichten und über elektrische Leitungen mit einer äußeren elektrischen Last verbunden. Dem Anoden-Gasraum wird Wasserstoff-Gas zugeführt, dessen Moleküle auf der Anodenoberfläche am Übergang zur Membranoberfläche an den Katalysatoren in Protonen und Elektronen dissoziieren. Durch das sich aufbauende Konzentrationsgefälle diffundieren die Protonen durch die protonenleitfähige Membran. Da diese Membran für die Elektronen nicht durchgängig ist, gibt es eine Ansammlung von Elektronen auf der Anodenseite. Dem Kathodenraum wird Sauerstoff oder sauerstoffreiches Gas, z. B. Luft, zugeführt. Der Sauerstoff wird an den Kathodenkatalysatoren in Ionen zerlegt und angelagert. Das sich so aufbauende elektrochemische Potential hat sein Gleichgewicht bei 1,2 V. Wird eine elektronenleitende Verbindung zwischen der Anode und der Kathode hergestellt, so können die Elektronen über diese zur Kathode fließen und in Verbindung mit den durch die Membran diffundierenden Protonen und den Sauerstoffionen zu Wasser reagieren. Die über die elektrische Verbindung durch die elektrische Last von der Anode zur Kathode fließenden Elektronen können somit eine elektrische Leistung der Höhe  $U \cdot I$  zur Verfügung stellen.

### 3.6.2 Konzeption und Bauteilanalyse

Im Folgenden werden der Aufbau des Brennstoffzellenstapels und des Brennstoffzellensystems inklusive der Wasserstoffspeicherung analysiert sowie deren Komponenten und Bauteile identifiziert und beschrieben.

#### 3.6.2.1 Der Brennstoffzellenstapel

Aufgrund der geringen äußeren Klemmenspannung einer Brennstoffzelle im Arbeitspunkt unter Last, typischerweise 0,7 V und einer Stromdichte von etwa  $0,75 \text{ A/cm}^2$ , werden Brennstoffzellen zur Leistungsabgabe im Kilowattbereich mit Elektrodenflächen von einigen hundert Quadratzentimetern gebaut und viele einzelne Brennstoffzellen in einem sogenannten Brennstoffzellenstapel sowohl elektrisch als auch verfahrenstechnisch zusammengefasst. Zur Veranschaulichung des technischen Aufbaus ist eine Brennstoffzelle mit ihren Einzelbauelementen, sogenannten Filterpressanordnung, in Abbildung 3.19 als Explosionsbild dargestellt.



**Abbildung 3.19: Aufbau eines Brennstoffzellenstapels.**

Bildquelle: DLR.

#### 3.6.2.2 Verfahrenstechnisches Konzept eines Brennstoffzellensystems

Der Brennstoffzellenblock benötigt für den elektrochemischen Umsetzungsprozess Wasserstoff und Sauerstoff sowie ein Kühlmedium zur Abgabe der Prozesswärme und eine Befeuchtung der Membran, die extern oder auch in manchen Konzepten intern realisiert ist. Zur Medienversorgung ist daher ein verfahrenstechnisches System erforderlich.



Der Wasserstoff wird über ein Regelventil aus einem H<sub>2</sub>-Speicher mit höherem Druckniveau dem Block mit einem niedrigeren Druckniveau kontrolliert zugeführt. Es ist möglich, die Wasserstoffmenge abhängig vom aktuellen elektrischen Strom direkt mengenproportional geregelt zuzuführen. Dies ist jedoch nicht zwingend notwendig, da der Wasserstoff vollständig als Ionen und Elektronen auf die Sauerstoffseite transportiert wird, so dass sich bei Einstellung eines konstanten Druckniveaus mittels einer Druckmindereinheit (Regelventil) ein kontrolliertes Nachströmen des Wasserstoffs vom Speicher zum Block aufgrund des Wasserstoffverbrauchs einregelt und keine Rückführung von Überschuss-Wasserstoff vom Ausgang zum Blockeingang notwendig ist (Dead-End-Prinzip).

Auf der Sauerstoffseite kann der Block mit gefilterter Umgebungsluft versorgt werden. Die Luft wird über einen Luftverdichter (Kompressor) aus der Umgebung angesaugt und unter Druck dem Block zugeführt. Luftseitig kommt das System nicht ohne eine Steuerung (besser wäre hier eine Regelung) des Luftverdichters aus. Da es keine prozesskontrollierte Zufuhrregelung der Verbrennungsluft gibt, ist die eingangsseitige, umsatzabhängige Luftmengenregelung notwendig. Über den Zusammenhang der Abhängigkeiten des Laststroms mit der Wasserstoffmenge und der Sauerstoffmenge kann unter Zunahme des Luft-Sauerstoffgehalts die Luftmenge in jedem Betriebszustand als Regelgröße eindeutig bestimmt werden. Da es für jeden Luftverdichtertyp aufgrund des Funktionsprinzips einen Zusammenhang von Luftmenge und Lieferdruck gibt, die Luftmenge aber abhängig vom Strom variiert und die Druckdifferenz zum Wasserstoff, aufgrund der sehr dünnen Zellmembranen in engen Toleranzen konstant gehalten werden muss, ist es in vielen Systemkonzepten erforderlich, den Luftbetriebsdruck unabhängig von der Liefermenge mit einem zusätzlichen Regelventil am Blockausgang zu kontrollieren.

Bei externer Membranbefeuchtung wird die Zufuhr von Feuchte über die Luft- und/oder die Wasserstoffseite geregelt. Bei interner Befeuchtung wird diese hauptsächlich über eine entsprechende Betriebsstrategie realisiert. Welches der Verfahren eingesetzt werden kann, hängt primär von der verwendeten Membran-Elektrolyt-Einheit (MEA) ab.

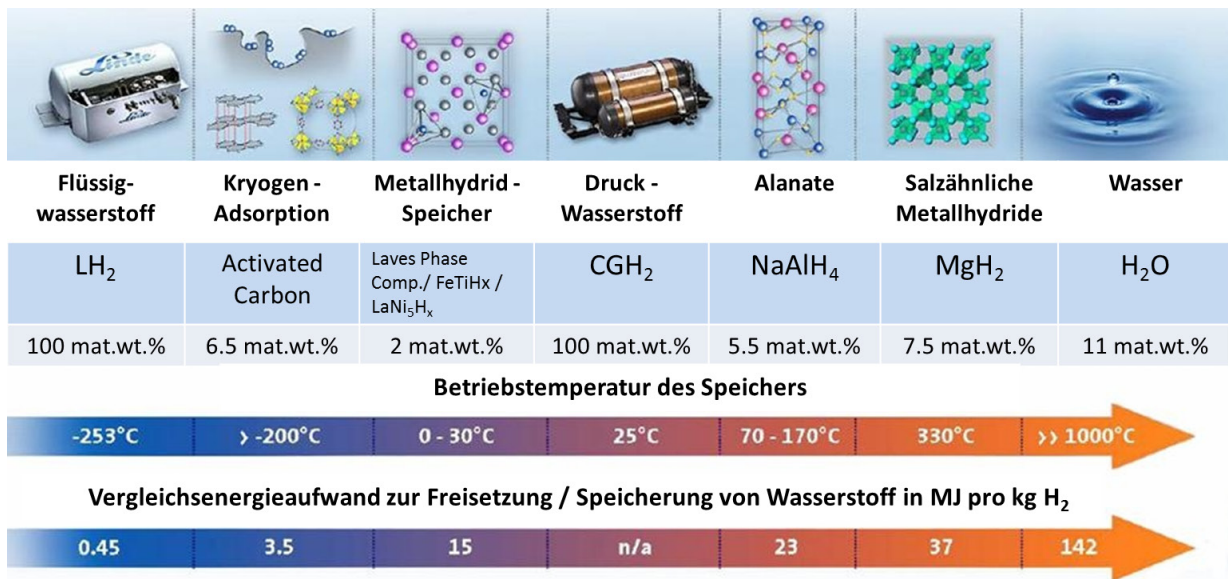


Abbildung 3.20: Verfahren und Technologie zur Wasserstoffspeicherung über der Temperatur aufgetragen mit Speicherdichte und Energieaufwand.

Quelle: von Helmholt et al. (2007).

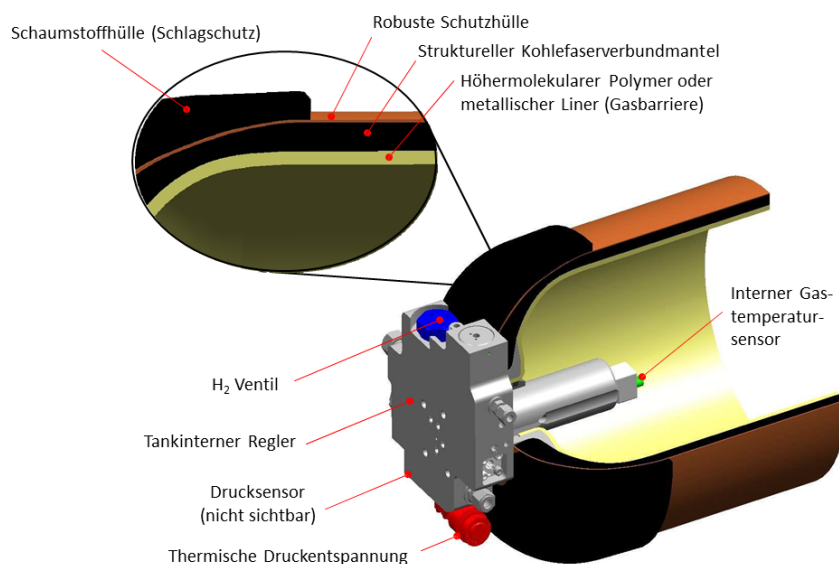
Der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenstapels liegt bei ca. 68% im optimalen Arbeitsbereich, der Restanteil des Energieinhaltes wird im Block als thermische Abwärme abgegeben. Um die thermische Energie abzuführen, ist eine Kühlung notwendig. Dafür gibt es sowohl die Möglichkeit der Luft- als auch der Wasserkühlung. Für eine hohe elektrische Energieausbeute ist es auf jeden Fall zwingend erforderlich, den optimalen thermischen Betriebspunkt der Brennstoffzelle zu erreichen. Hierzu ist eine geregelte Kühlung notwendig.

Die elektrische Bruttoleistung des Blocks wird nicht direkt an den Verbraucher weitergeben, sondern ein Teil davon wird für den Eigenbedarf benötigt. In dem verfahrenstechnischen Konzept wurden zur Brennstoffaufbereitung auch die Module Reformer und Gasreinigung aufgeführt, um die Brennstoffzellenkonzepte mit dieser Technologie als mögliche Kandidaten abzudecken. Diese sind jedoch bei reinen Wasserstoffsystemen nicht erforderlich.

Ein PEFC-System mit Wasserstoff als Brennstoff ist derzeit das aussichtsreichste Systemkonzept für ein Brennstoffzellenfahrzeug oder ein Fahrzeug mit einem Brennstoffzellen-Range-Extender. Da, wie eingangs beschrieben, flüssige DMFC-Systeme oder Onboard-Reformierung in dieser Studie nicht betrachtet werden, gehen wir an dieser Stelle spezifisch nur auf die Wasserstoffspeicherung als Subsystem ein.

Massenspezifisch ist Wasserstoff mit dem 2,8-fachen Energieinhalt von Benzin der Brennstoff mit der höchsten gravimetrischen Energiedichte. Volumenspezifisch kann Wasserstoff gegenüber Benzin jedoch nur knapp 27% des Energieinhaltes speichern (Vergleichsreferenz: Flüssig-Wasserstoff bei  $-253^{\circ}\text{C}$  und 1,013bar). Um vergleichbare Reichweiten zu Fahrzeugen mit Kohlenwasserstoffen als Kraftstoff zu erreichen, ist deshalb neben dem energieoptimierten Betrieb ein Speicher mit hoher volumenspezifischer Energiedichte entscheidend.

In Abbildung 3.20 sind verschiedene bekannte Speichertechnologien nach Betriebstemperatur und Vergleichsenergieaufwand zur Wasserstoffherstellung/-freisetzung in ansteigender Reihenfolge von links nach rechts dargestellt.



**Abbildung 3.21: Aufbau eines typischen Hochdruckgastanks.**

Quelle: von Helmolt et al. (2007).



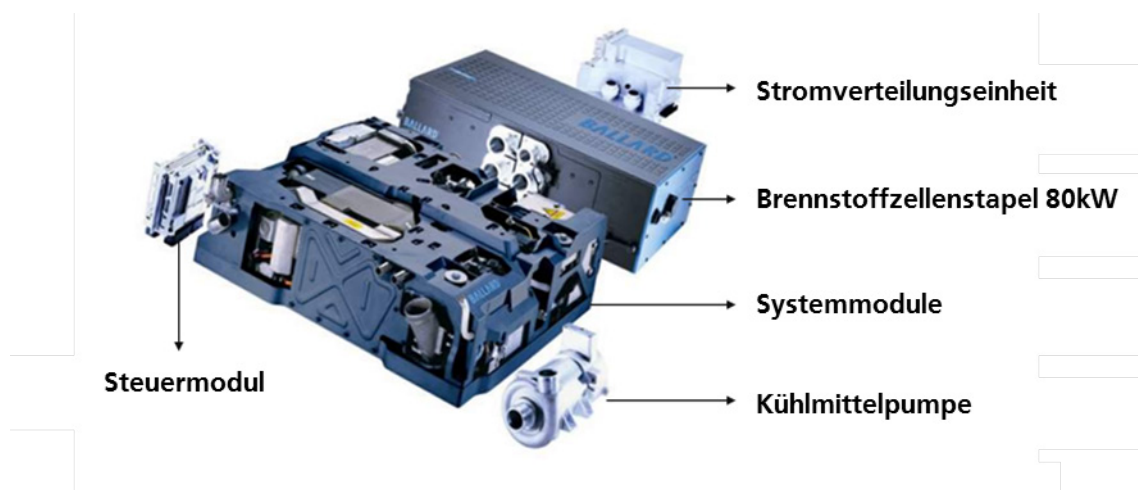
Die heute gängigste Art des Wasserstoffspeichers ist der Druckspeicher, der in den Druckbereichen 200, 300, 350 und 700 bar erhältlich ist. Bis zu 350 bar handelt es sich um Serienprodukte, die bei 200 und 300 bar als Stahl- oder Aluminiumflaschen und für 350 bar als Aluminium-Glas-/ Kohlefaser-Kompositpeicher in verschiedenen Größen hergestellt werden. 700 bar-Flaschen als hoch belastete Faser-Wickelflaschen befinden sich derzeit im Entwicklungs- und Erprobungsstadium, z. B. eingesetzt im Daimler F-Cell B-Klasse. Beim Einsatz von Druckspeichern ist zu berücksichtigen, dass nicht nur vom Brennstoff Wasserstoff, sondern auch vom hohen inneren Überdruck Gefahren ausgehen, die sicher vermieden werden müssen. Bei den Speichern im Bereich von 700 bar spielt zusätzlich eine wesentliche Rolle, dass der Energieaufwand für die Betankung bei 700 bar etwa 15% beträgt.

Abbildung 3.21 zeigt als Beispiel den Aufbau eines typischen Hochdruckgastanks. Diese können für 350 bar oder auch 700 bar ausgelegt sein. In Abhängigkeit der geforderten Leistung des Fahrzeugs würden ca. 3 solche Tanks (ca. 4,2 kg H<sub>2</sub> @ 700 bar) für PKWs und ca. 8 bei Bussen eine entsprechenden Reichweite von ca. 200 km beim Einsatz der 350 bar Technologie und ca. 500 km in der 700 bar Technologie bedeuten. Die Tanks werden heute üblicherweise mit einem Inliner z. B. aus einem hochdichten Polymer oder Aluminium, für Hochdrucktanks und einer druckstabilisierenden Kohlenstoffwicklung mit Epoxidharz versehen. In die Tanks werden Druckregel- und Sicherheitsventile integriert. Heutige Brennstoffzellenfahrzeuge der Mittelklasse mit einem 80 kW Brennstoffzellensystem haben bereits einen hohen Reifegrad erreicht. Diese speichern ca. 4 kg Wasserstoff an Bord und erzielen damit eine Reichweite von bis zu 400 km.

Die einzelnen Subsysteme des Brennstoffzellen-Systems inklusive des Wasserstoffdruckspeichers wurden in die Analyse einbezogen und derer Komponenten mitbewertet (s. Abschnitt 3.6.4).

### 3.6.2.3 Systemintegration und Packaging

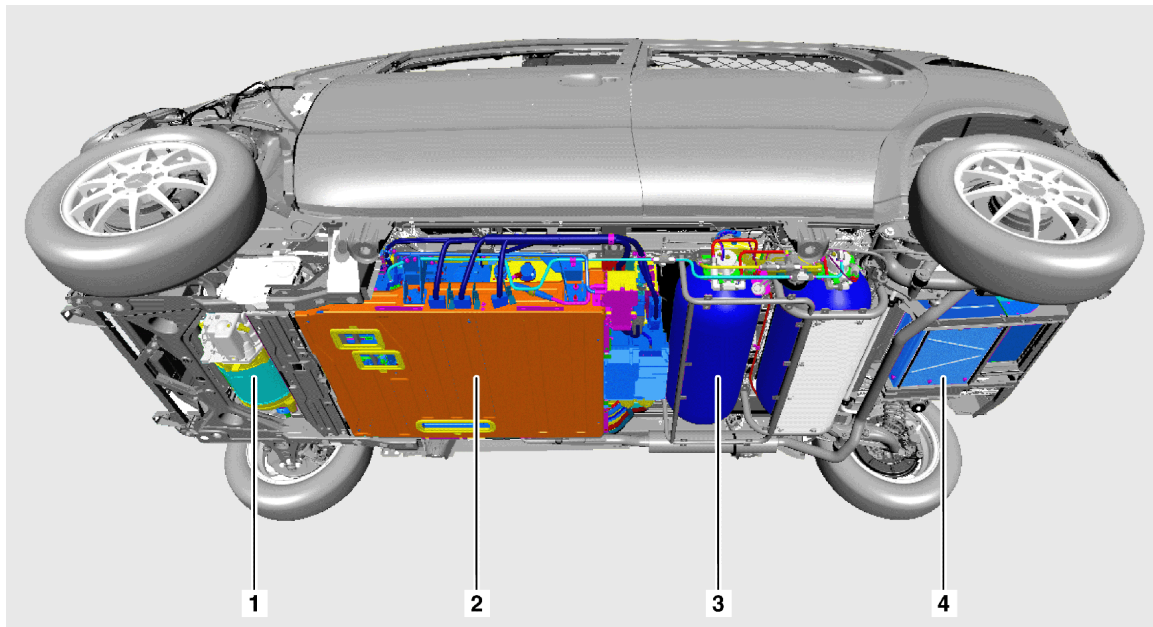
Beim Packaging gilt es, die im Abschnitt 3.6.2.2 beschriebenen Module und Subkomponenten in einer geeigneten Form in die im Fahrzeug verfügbare Bauräume zu integrieren und dabei den Platzbedarf so gering wie möglich zu halten.



**Abbildung 3.22: Packaging des Xcellsys HY-80 Brennstoffzellensystems für die Fahrzeugintegration.**

Quelle: Ballard (2004).

Gängige Brennstoffzellensysteme, welche in verschiedenen Anwendungen eingesetzt werden, sind heute üblicher Weise in rechteckige Gehäuse eingebaut (Abbildung 3.22). Begründet ist dies durch die Randbedingungen der Sicherheit, Einfachheit und der geringen Stückzahlen und somit der Vermeidung einer aufwendigen Fertigung.



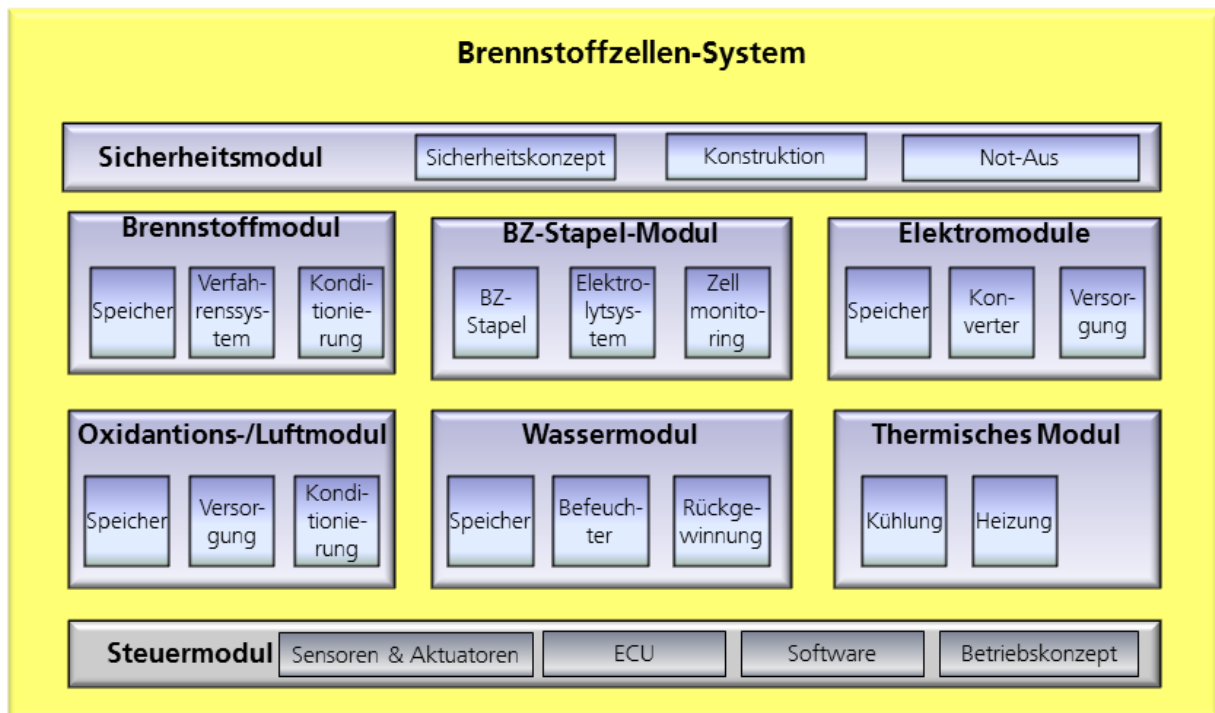
**Abbildung 3.23: Integration der Brennstoffzellekomponenten am Beispiel des f-Cell A-Klasse von Daimler mit den Komponenten Elektromotor (1), Brennstoffzellensystem (2), Hochdruckspeicher (3) und Hochspannungsbatterie (4).**

Quelle: Stauch (2005).

Im Falle von Großserienfertigung wird man dazu übergehen, die Systeme für das Fahrzeug in geeigneter Bauform dem Platzangebot entsprechend zu integrieren. Das Prinzip des Brennstoffzellensystems bietet hierzu eine fast beliebige Variationsmöglichkeit. Abbildung 3.23 zeigt ein Beispiel für die Integration von Brennstoffzellen-Systemen in Fahrzeugen. Typischerweise befinden sich Brennstoffzellensystemkomponenten hauptsächlich im Boden- und hinteren Bereich des Fahrzeuges, die Kühlung hingegen im Frontbereich. Einen wesentlichen Vorteil bei Montagelogistik und Kosten werden Brennstoffzellensysteme bieten, die Package-kompatibel mit den Interfaces von Verbrennungsmotoren sind. An geeigneten Entwicklungen dafür wird in der Region intensiv gearbeitet.

#### 3.6.2.4 Bauteilanalyse

Zur Bewertung und Analyse der Wertschöpfungskette wurde das Brennstoffzellensystem entsprechend der in Abbildung 3.24 definierten Module aufgeteilt. Diese wurden dann jeweils in den Bewertungsmatrizen als Baugruppe definiert und mit einem Wertschöpfungsanteil gewichtet.



**Abbildung 3.24: Systemdefinition eines repräsentativen PEFC-Systems mit Systemmodulen und deren Subsystemen.**

Quelle: Philipps (2006).

Insgesamt wurden für das Brennstoffzellensystem acht Module als Baugruppen analysiert und die Fertigung der zugehörigen Komponenten sowie der erforderlichen Materialien definiert. Im Einzelnen sind dies:

- BZ-Modul mit den Subsystemen Brennstoffzellenstapel (mit den Komponenten Membran, Katalysatoren, Bipolarplatten, Dichtungen, u. a., vgl. Abbildung 3.19). Zellkontrolle und Elektrolytmodul (nicht bei PEFC-Systemen)
- Brennstoffmodul mit den Einheiten Speicher und Wasserstoffkonditionierung (ohne Reformierung).
- Oxidations-/Luftmodul mit Oxidantversorgung (in diesem Fall Verdichtersystem), Oxidantkonditionierung (Luft-Befeuchter sowie Temperatur-, Druck-, und Durchflussregelung)
- Wassermanagementmodul mit Wasserspeicher, Befeuchtungseinheit, Wasseraufbereitung
- Thermisches Modul mit Kühlersystem und Wärmeversorgung
- Das Steuer- und Sicherheitsmodul mit Sensoren und Aktuatoren, Steuerung, Betriebsstrategien und entsprechender Software. Diese Bauteile wurden in den Bewertungsmatrizen als eine Baugruppe definiert und als eine Einheit betrachtet
- Das elektrische Modul mit elektrischem Speicher, Leistungswandlung und Energieversorgung. Da diese Einheiten auch Bestandteil anderer Elektrofahrzeuge sind, werden diese separat in den Kapiteln 3.4 sowie 3.5 analysiert und in entsprechenden Bewertungsmatrizen, inklusive der Wertschöpfungsketten, bewertet

### 3.6.3 Entwicklungspotentiale eines PEFC Brennstoffzellensystems

Der ideale Wirkungsgrad einer PEFC Brennstoffzelle ist unter Standardbedingungen 83,3%. Liegt das Produktwasser in der Gasphase, beträgt der ideale Wirkungsgrad einer PEFC Brennstoffzelle sogar 94,5% (Heinzel et al. 2006). Im Bereich der Brennstoffzellentechnologien, bei den derzeit realisierten Brennstoffzellenstapeln und Brennstoffzellensystemen ist man noch weit vom idealen Wirkungsgrad entfernt. Die derzeit für PEFC-Stapel erreichten Wirkungsgrade liegen im Bereich 50-68% (vgl. Abbildung 3.15) und die für PEFC-Brennstoffzellensysteme realisierten Wirkungsgrade im Bereich von 50 bis 58%. Damit sind das Entwicklungspotential und die möglichen Ansatzpunkte genannt. Diese lassen sich in die zwei Kategorien Brennstoffzellen bzw. Brennstoffzellenstapel und Systemoptimierung einteilen. Neben der Kostenoptimierung, auf die kurz eingegangen wird, lassen sich damit hauptsächlich zwei Ziele benennen, die als technisches Entwicklungspotential verfolgt werden. Einerseits die Wirkungsgrad- sowie die Leistungssteigerung der Brennstoffzellenstapel und andererseits die Verringerung des Energieverbrauchs der Peripherie durch Systemvereinfachung bzw. Optimierung der Nebenaggregate. Für den automobilen Einsatz kommen noch die Randbedingungen der Gewichts- und Volumenreduktion als Optimierungsbedarf sowie die Herausforderungen der on-Board-Wasserstoffspeicherung (speziell für Langstreckenfahrzeuge) und des Wärmemanagements des Niedertemperatur-PEFC-Brennstoffzellensystems, das systembedingt auf niedrigem Temperaturniveau arbeitet und damit innovative Konzepte oder große Flächen für den Wärmeaustrag erfordert. Diese Probleme lassen sich mit Hochtemperatur-Brennstoffzellensystemen umgehen.

Die Auswirkungen einer Veränderung entweder des Systems oder des Stapels sind voneinander nicht unabhängig. Damit gilt die Aussage, dass eine Optimierung aller Parameter, welche einen direkten Einfluss auf die Leistungsdichte und Funktionsvereinfachung des Brennstoffzellsystems haben, die Weiterentwicklung bestimmt. Als Ansatzpunkte für ein mögliches Entwicklungspotential aus technischer Sicht sind derzeit zu benennen:

#### **Hochtemperaturmembranen**

Eine Hochtemperatur-PEFC würde in erster Linie eine Reduktion der Systemkomponenten bedeuten. Primär würde dies zu einer Verkleinerung der Wärmetauscher und, je nach Bauart, auch zur Vereinfachung oder gar Wegfall der Befeuchtung führen.

#### **Wasserfreie Membranen**

Die Verfügbarkeit einer wasserfreien, protonenleitenden Membran für Brennstoffzellen würde eine drastische Systemvereinfachung bedeuten. Durch die Eliminierung der gesamten Befeuchtung als Systembestandteil ergibt sich eine einfachere Handhabung der Betriebsstrategien sowie des Kaltstartverhaltens. Mittels wasserfreien Membranen sind auch Hochtemperaturkonzepte realisierbar, da die Temperaturlimitierung durch das Wasserverdampfen in der Membran nicht mehr gegeben ist.

#### **Katalysatoren**

Eine Katalysatorreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung des Dreiphasensystems könnte zur Leistungssteigerung und Kostenreduktion der Brennstoffzelle beitragen. Einen weiteren Entwicklungsaspekt stellen auch Katalysatoren, die eine höhere CO-Toleranz aufweisen, dar. Damit könnte der Anspruch an die Reinheit des Wasserstoffs gesenkt werden, was aufgrund des geringeren Gas-Reinigungsaufwands zu einer Reduktion der Brennstoffkosten führen würde.

#### **Befeuchtung**

Das Wegfallen einer Membranbefeuchtung, sowohl der externen als auch einer internen, erwirkt eine Systemvereinfachung und führt somit zur Erhöhung des Systemwirkungsgrades, der Leistungsdichte und zu einer Kostenreduktion der Systeme.

### **Wärmemanagement**

Auch die Kühlung von PEFC-Systemen stellt in Fahrzeugen einen Optimierungsbedarf dar. Aufgrund des geringen Temperaturgradienten der Umgebungstemperatur zur Stapeltemperatur, müssen Kühler für PEFC-Systeme großflächig ausgelegt werden, was im automobilen Bereich zu Platzproblemen und hohem Gewicht führt.

### **Kühlung, Kühlmittel**

Für die direkte Flüssigkeitskühlung sind nichtleitfähige Kühlmittel von Interesse, im Speziellen in Kombination mit der Fragestellung der Kaltstartfähigkeit. Da bei flüssig gekühlten Systemen das Kühlmedium direkt durch die Zelle geführt wird, bedeutet schon eine geringe Leitfähigkeit des eingesetzten Kühlmittels Wirkungsgradverluste, da Ladungsströme dann nicht nur über den externen Verbraucher, sondern auch als interne Verlustströme eine Leistungsminderung herbeiführen.

### **Niederdrucksysteme**

Niederdrucksysteme stellen eine Wirkungsgradoptimierung auf der Systemebene dar. Da die Druckerzeugung durch Luftverdichtung sehr energieaufwendig ist, trägt dies stark zur Reduktion des Systemwirkungsgrades bei. Dieser Ansatz minimiert den Energiebedarf des Luftversorgungssystems. Da aber die Funktionen des Brennstoffzellenstapels stark druckabhängig sind, bedarf es einer Gesamtoptimierung inklusive neuer Betriebsstrategien.

### **Systemvereinfachung**

Eine Systemvereinfachung führt einerseits durch die Gewichts- und Volumenreduktion zur Erhöhung der gravimetrischen und der volumetrischen Leistungsdichte, aber auch zur Wirkungsgradverbesserung und zur Kostenreduktion. Eine Verringerung der System-Komplexität stellt auch eine Erhöhung der Systemrobustheit und Vereinfachung der Betriebsstrategien dar. Dies kann einerseits durch funktionsintegrierte Komponenten und vereinfachte Systemkonzepte sowie andererseits durch Entwicklungen kostengünstiger, spezieller, automobilgeeigneter Komponenten erreicht werden.

### **Nebenaggregate**

Da viele der heute in der Brennstoffzellentechnologie eingesetzten Komponenten der Verfahrenstechnik bzw. dem Anlagenbau entstammen, liegt ein weiteres Entwicklungspotential in der Optimierung der Nebenaggregate selbst. Die meisten Nebenaggregate sind derzeit nicht speziell für den Einsatz in einem Brennstoffzellensystem ausgelegt und insbesondere nicht für den Einsatz in Fahrzeugen optimiert. Dies gilt in der Regel für Betrieb, Dynamik, Herstellungsverfahren und Laufzeiten. Auch die Anpassung der Arbeitsbereiche der Systemaggregate muss noch für eine Serienreife durchgeführt werden. Im Speziellen würden Luftverdichter mit effizienten Antrieben und integrierter Elektronik zur Reduktion des Energieverbrauchs beitragen. Eine weitere Entwicklungsherausforderung stellt die Optimierung aller Systemkomponenten und der Betriebsstrategien für den dynamischen Betrieb dar.

### **Sonstiges**

Die hier aufgeführten Entwicklungspotentiale und Optimierungsansätze bieten unter den oben aufgeführten Aussagen Raum für weitere Ansatzpunkte, die zu Verbesserungen und Systemoptimierungen führen. Die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik hat hier noch ein großes Potential für weitere Forschungen und Entwicklungen.

Von Seiten der technischen Entwicklung liegt dabei ein Schwerpunkt auf der automobilgerechten Systemkonzeptionierung und -erstellung, insbesondere bei der Integration von Subsystemkomponenten und möglichen Betriebsstrategien. Als übergeordnete Ziele sind zu nennen: Erhöhung der volumetrischen und gravimetrischen Leistungsdichte der Brennstoffzellenstapel und des Systems sowie ausreichende on-Board Speicherung von Wasserstoff. Als Ziele für PEFC-Stapel werden vom DOE (Department of Energy, USA) für 2010 2 kW/l und kg sowie von Ballard 2,5kW/l genannt. Zusätzlich müssen alle Subsysteme den Umwelt- und Lebensdauernforderungen im Automobilbereich entsprechen. Ebenso muss die Recyclingfähigkeit der

eingesetzten Materialien bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Da bei allen Anforderungen stets die Kosten im Vordergrund stehen und eine Stückzahlerwartung wie beispielsweise bei einer heutigen Mittelklassewagenreihe kaum realistisch ist, steht eine hohe Modularisierbarkeit im Vordergrund, verbunden mit einer möglichst hohen Einzelfunktionalität und zusammenfassenden Integrierbarkeit.

Die Fertigungs- und Zulieferprozesse müssen auf das automobiler Umfeld abgestimmt sein, was Verfügbarkeit, Zugang zu Zweitlieferanten bzw. zu Produktvarianten, die Absicherung der Produktion gegen Ausfälle bei unvorhergesehenen Ereignissen, die Rückverfolgbarkeit der Prozess-Schritte bei Unfällen und gegebenenfalls die Sicherstellung der Einflussnahme auf untergeordnete Prozesse der Zulieferer, speziell bei sicherheitsrelevanten Teilen, anbelangt.

Ebenso besteht Entwicklungsbedarf im Bereich Schulungen im Umgang mit Hochvolteinrichtungen und Wasserstoff in der Entwicklung, der Produktion und den Servicewerkstätten, aber auch in denen an der Verkehrsinfrastruktur teilnehmenden Partner wie Feuerwehr, Polizei und Krankendienste.

Ein wichtiger Eckpunkt ist weiterhin die Bereitstellung einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur. Diese ist einer der entscheidenden Faktoren für die Marktakzeptanz und -durchsetzung von Brennstoffzellen in Kraftfahrzeugen. Nicht zuletzt sind Normen- und Standard-Entwicklungen für die Herstellung, Prüfung und Beurteilung zu schaffen, um eine Vergleichbarkeit und Qualitätssicherung zu erreichen.

### 3.6.4 Kosten

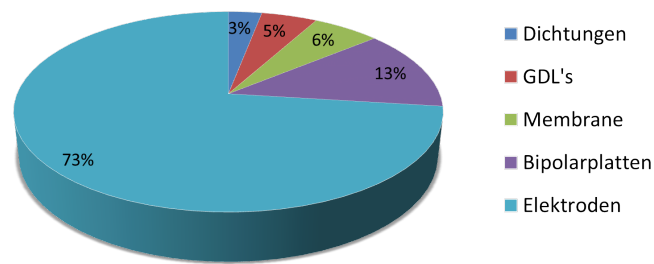
Heutige Brennstoffzellensysteme werden noch nicht unter Großserienbedingungen hergestellt. Außerdem wird von den Herstellern der Entwicklungsaufwand sehr unterschiedlich in den Kosten berücksichtigt. So kann man ein Brennstoffzellensystem im Bereich von 16 kW für ca. 40.000.- € kaufen. Der Kostentreiber bei Brennstoffzellensystemen ist der Brennstoffzellenstapel, ca. 40% bis 50% der Gesamtsystemkosten entfallen auf diese Baugruppe. Bei den Stapelkomponenten zeigt sich deutlich (Abbildung 3.25), dass die Elektroden der kostenintensivste Faktor sind. Dies ergibt sich aufgrund des verwendeten Katalysatormaterials Platin. In den letzten Jahren wurden hier bereits Fortschritte erzielt, was die Reduktion der Platinbeladung der Elektroden anbelangt, ein günstigerer Werkstoff oder weitere Reduzierungen der Platinanteile würden sich positiv auf die Kosten auswirken.

Kostenensenken ergeben sich jedoch weiterhin vor allem durch den Einsatz anderer Materialien oder verbesserter Fertigungsschritte sowie der Großserienfertigung. (McK 2010).

Eine Kostenreduktion für Gesamtsysteme auf das Niveau der konventionellen Fahrzeuge scheint nach Aussagen der Automobilindustrie durch technische Weiterentwicklung, Installierung und Etablierung geeigneter Zulieferindustrie und eine Kostenreduktion durch Serienproduktion (Stückzahlerhöhung) für Brennstoffzellenfahrzeuge erreichbar.

Im Bereich der Kostenreduktion besteht das Hauptentwicklungspotential in der Großserienherstellung bzw. Einführung automobiler Prozessfähigkeit, Herstellung der notwendigen Zulieferer-Infrastruktur und des Servicebereichs. Eine Beschleunigung der Serienreife von Brennstoffzellentechnologien und deren Markteinführung könnte vor allem durch Forschungsarbeiten an Herstellungsverfahren erreicht werden. Die Einführung geeigneter Infrastrukturen zur Wasserstoffversorgung würde dies positiv beeinflussen.





**Abbildung 3.25: Prozentuale Kostenverteilung der BZ-Stapelkomponenten bei einer Großserienfertigung.**

Quelle: DLR.

### 3.6.5 Zusammenfassung

Die Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnik zeigt eine attraktive Option für zukünftige Fahrzeuganwendungen, im Speziellen für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge im Langstreckenbetrieb. Selbst bei nur gering ausgebauter Wasserstoffinfrastruktur wäre ein Brennstoffzellen- Fahrzeug oder Brennstoffzellen-Range-Extender für Batteriefahrzeuge aufgrund der hohen Flexibilität ein attraktiver Kandidat. Ein weiterer hervorzuhebender Vorteil der Brennstoffzelle ist die lokale emissionsfreie Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie. Das bedeutet, dass der Heizbedarf des Fahrzeuges nicht aus der Batterie bedient werden muss. Hierdurch kann folglich zusätzlich die Reichweite des Fahrzeuges gesteigert werden.

Eine Großserienproduktion von Brennstoffzellensystemen für Fahrzeuge gibt es derzeit noch nicht, da der Durchbruch der Technologie noch nicht erfolgte. Die aufgebauten und realisierten Systeme sind in der Regel Einzelanfertigungen und als Unikate oder Kleinstserie zu betrachten. Ob ein Durchbruch erfolgt und die Behauptung auf dem Markt gegen bestehende Systeme gelingt, ist nicht abzuschätzen und hängt stark von der vorgegeben Rahmenbedingungen ab (vgl. Kapitel 6). Ein Brennstoffzellensystem selbst besteht aus verschiedenen Modulen, die in Bezug auf deren Einsatz an die verwendeten Technologien verschiedene Ansprüche stellen. Dabei gibt es vorhandene Technologien, die aus artverwandten Bereichen und Branchen direkt oder angepasst verwendet werden können. Andererseits sind auch Module im System enthalten, die technologisches Neuland darstellen und sich zum Teil noch im Vorentwicklungs- oder Forschungsstatus befinden. Einen ganzheitlichen Überblick zu bekommen ist also notwendig und sinnvoll.

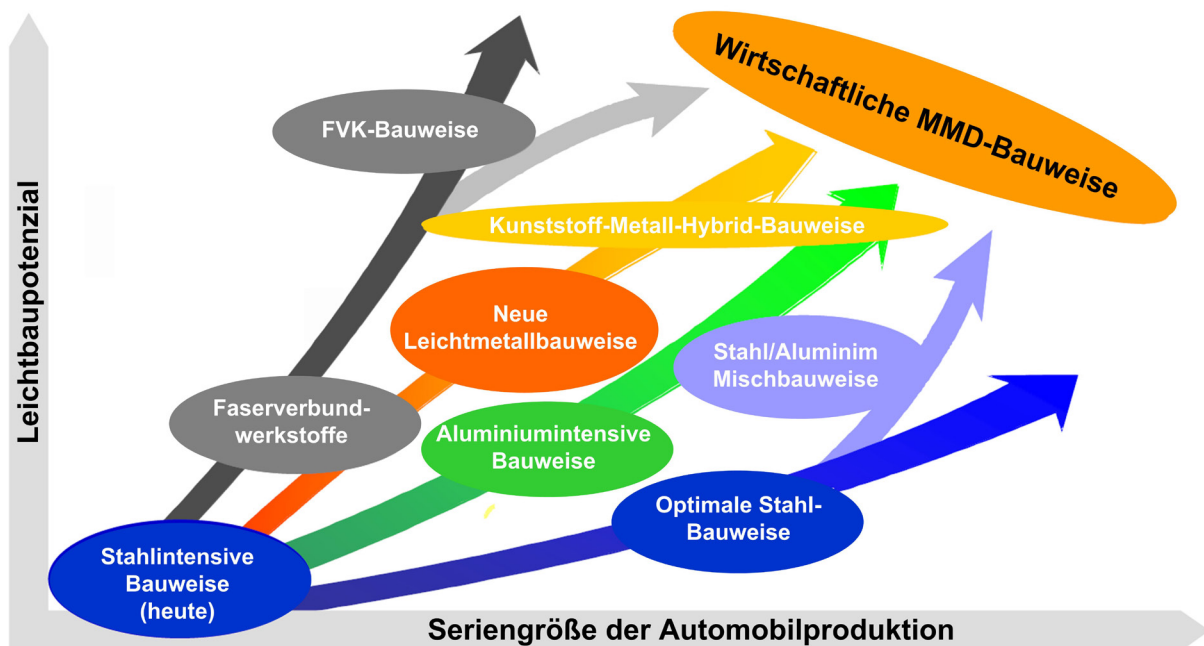
Um marktfähige Brennstoffzellenprodukte in Baden-Württemberg anbieten zu können, ist es erforderlich, Technologiekompetenzen bei Komponentenherstellern bis hin zu Systemherstellern zu fördern und Know-how zu bündeln. Diese Maßnahmen sind vor allem dann zielführend, wenn eine Markteinführung der Brennstoffzellensysteme und -technologien so gefördert wird, dass für Hersteller eine Serienfertigung attraktiv und wirtschaftlich lohnend ist. Eine engere Verknüpfung von Industrie und Forschung erscheint notwendig und sinnvoll, was von allen Experten im Rahmen der durchgeführten Workshops bestätigt wurde.

Anmerkung: Die Ausführungen der Studie zu Kapitel 3.6 greifen auf die aktuell durchgeführte Rexel-Studie im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg zurück. Darin finden sich auch Ergänzungen zu den brennstoffzellenrelevanten Kompetenzen in Baden-Württemberg.



## 4 Analyse zukünftiger Fahrzeugstrukturen

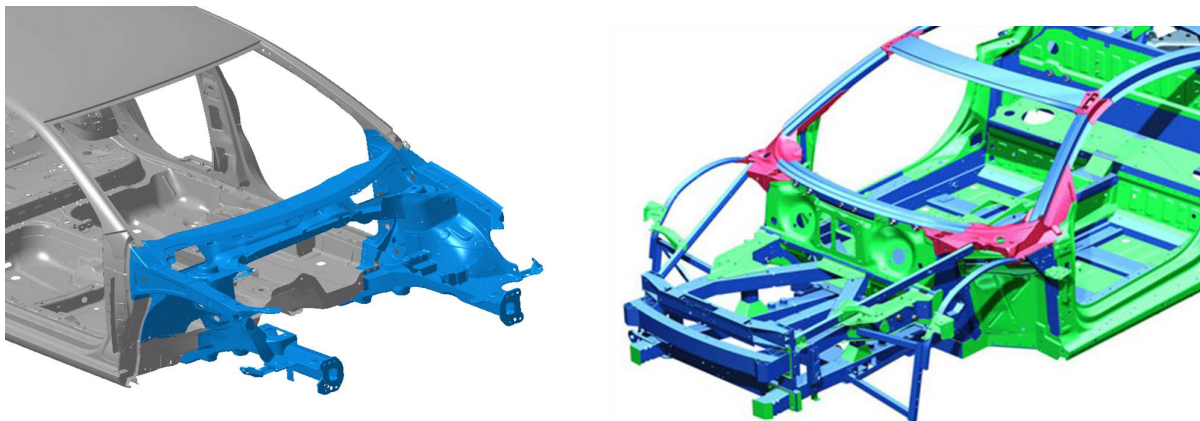
Im Vergleich zu den im Kapitel 3 beschriebenen Antriebskomponenten gibt es bei der Auslegung von Fahrzeugstrukturen deutlich weniger direkte Zusammenhänge zwischen einer gewählten Antriebsart und der Bauweise. Bereits heute werden verschiedene Antriebsmodule wie Otto-, Diesel-, Erdgas- oder Hybridantriebsvarianten in unterschiedlichen Leistungsklassen in gleichartige Fahrzeugstrukturen eingebaut. Eine Anpassung der Fahrzeugstruktur an höhere Leistungen oder Massen erfolgt über kleine Änderungen, z. B. an den für die Crashenergieabsorption wichtigen vorderen Längsträgerstrukturen. Für die eigentliche Bauweise der Fahrzeugstruktur sind bislang Fragen des Produktionsvolumens (vgl. Abbildung 4.1 und (Durst 2010)), der Kosten (Friedrich et al. 2008a) und häufig auch der bestehenden Infrastruktur in Automobilwerken als maßgebliche Einflussgrößen zu identifizieren.



**Abbildung 4.1: Leichtbaupotentiale und mögliche Seriengrößen unterschiedlicher Fahrzeugstrukturbauweisen.**

Quelle: Goede (2011).

Relevante Unterschiede in der Fahrzeugstruktur gibt es jedoch auch in heutigen Fahrzeugen dann, wenn Fahrzeuge eine stark geänderte Antriebsarchitektur aufweisen. Wie in Abbildung 4.2 ersichtlich, weisen Fahrzeuge mit Frontantriebsanordnung eine andere Vorderwagenstruktur auf als Fahrzeuge mit Mittel- oder Heckantrieb. Die bei elektrifizierten Fahrzeugantrieben gegebenen Veränderungen in Antriebsarchitektur, Packagebedarf und Massenverteilung im Fahrzeug lassen deshalb einen Bedarf an neuen Fahrzeugstrukturlösungen erwarten.



**Abbildung 4.2: Vorderwagenstrukturen mit einer Frontantriebsanordnung im VW Golf 5 (links) und Mittelmotoranordnung im Audi R8. (rechts)**

Bildquellen: EU-SuperlightCar projekt (links), [www.carbodydesign.com](http://www.carbodydesign.com) (rechts).

Die folgende Analyse zielt darauf ab, mögliche Zukunftstrends und Forschungsbedarfe in Bezug auf Werkstoff- und Karosseriekonzepte bei zukünftigen elektrifizierten Fahrzeugen aufzuzeigen und zu begründen. Gemeinsam mit Experten aus dem Bereich der Fahrzeugstruktur wurden in Workshops Impulsgeber und Treiber identifiziert, welche in der Fahrzeugstruktur zu veränderten Bauweisenlösungen führen können und welche sich durch die Elektrifizierung in relevantem Maße verändern. In Kapitel 4.2 werden darauf aufbauend Technologie- und Gestaltungsoptionen für die Verbesserung von zukünftigen Fahrzeugbauweisen beschrieben und Qualifikationsbedarfe in der Fahrzeugindustrie identifiziert.

## 4.1 Impulsgeber für Veränderungen der Fahrzeugstruktur alternativ angetriebener Fahrzeuge

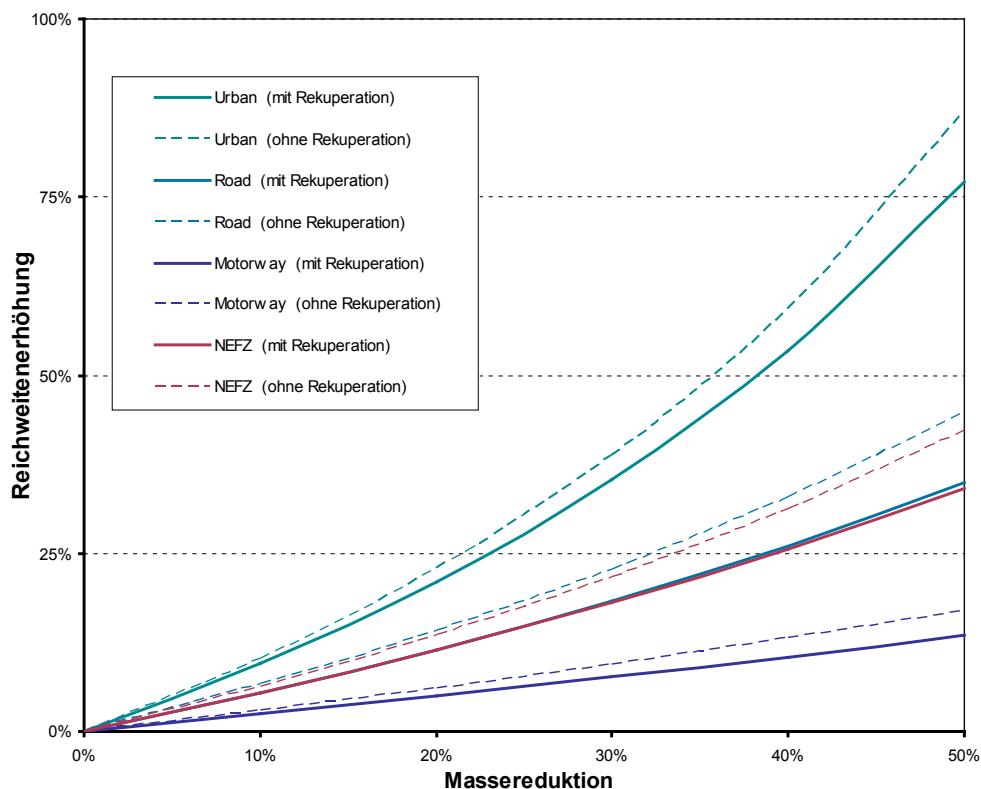
Um Aussagen über zukünftige Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugstruktur treffen zu können, wurden unter Einbeziehung von Expertenmeinungen die Einflussgrößen und Impulsgeber für Veränderungen der Fahrzeugstruktur identifiziert, welche durch die Wahl alternativer Antriebsvarianten verändert bzw. relevant werden. Die im Folgenden beschriebenen Einflussgrößen kommen in der heutigen Fahrzeugentwicklung bereits vor, sie gewinnen aber für alternative Antriebskonzepte weiter an Bedeutung.

### 4.1.1 Reduzierung des Fahrzeuggewichts

Bedingt durch die stetige Vergrößerung der Fahrzeugabmessungen, die Verbesserung der Sicherheit und den Einbau vieler komfortbedingter Zusatzfunktionen kam es in den vergangenen Jahrzehnten zu stetigen Steigerungen der Fahrzeugleergewichte. Dennoch wurde auch in der Vergangenheit versucht, diese Gewichtszunahmen durch Leichtbaumaßnahmen zu minimieren.

Die Fahrzeugmasse beeinflusst die Energiebedarfsseite über die physikalischen Zusammenhänge der Fahrwiderstandsgleichung. Aus diesem Grund hängt die Wirksamkeit von Leichtbaumaßnahmen nicht primär von der gewählten Antriebsart ab. Wesentlich größeren Einfluss hat die Art der Fahrzeugnutzung in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrprofile (Stadt, Überland, Autobahn). In Abbildung 4.3 wird aufgezeigt, wie sich bei einem Elektrofahrzeug die Reichweite (disproportional zum Energieverbrauch) durch Massereduktion verändert. Zu erkennen ist, dass Leichtbaumaßnahmen für den Fahrzeugbetrieb im Stadt-

verkehr am wirksamsten sind. Die häufig getroffene Annahme, dass die durch Rekuperation zurück gewonnene Bremsenergie Leichtbaumaßnahmen überflüssig macht, kann in diesen Studien nicht belegt werden.



**Abbildung 4.3: Reichweitenerhöhung durch Massereduktion bei einem kleinen Fahrzeug (Masse 1000kg) bei unterschiedlichen Fahrzyklen.**

Quelle: Friedrich (2010).

Im Vergleich zu elektrifizierten Fahrzeugen sind bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen durch Leichtbaumaßnahmen größere Verbrauchseffekte zu erzielen (Dick 2011). Bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist dennoch mit zunehmenden Leichtbuanstrengungen zu rechnen. Hierbei spielen die folgenden Überlegungen eine wichtige Rolle:

Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb sind die Optimierungsmöglichkeiten bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen deutlich eingeschränkter. Die Umsetzung der gespeicherten Energie in Elektromotoren erfolgt durch die vergleichsweise hohen Wirkungsgrade wesentlich effizienter als bei konventionellen Antrieben. Das Handlungsfeld verlagert sich von der Energiewandlungsseite auf die Energiebedarfsseite, wodurch Leichtbau stärker in den Blickpunkt rückt.

Wird eine Erhöhung der elektrisch fahrbaren Reichweite angestrebt, so kann entweder die Batterie vergrößert oder der Energiebedarf durch Leichtbau reduziert werden. Die Vergrößerung der Batterie benötigt zusätzlichen Bauraum und führt zu einer höheren Fahrzeugmasse. Dies kann eine nach oben gerichtete Gewichtsspirale zur Folge haben, weil beispielsweise die Fahrzeugstruktur im Hinblick auf Crashlastfälle verstärkt werden muss (Beeh et al. 2010).

Leichtbau hingegen ermöglicht die Erhöhung der Reichweite ohne zusätzlichen Raumbedarf und führt zu

einem insgesamt effizienteren Gesamtsystem. Diese Effekte können bereits in der Produktentwicklung für ein neues Fahrzeug einfließen und führen möglicherweise zu einem Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Anbietern, welche alternativ zur Massereduktion auf die Verwendung größerer Batterien setzen.

Neben den beschriebenen technischen Aspekten kann die Reduzierung der Fahrzeugmasse gegenüber der Vergrößerung der Batteriekapazität wirtschaftlich attraktiv sein. Bei heute absehbaren zukünftigen Batteriekosten von 300 bis 1000 €/kWh ergeben sich zulässige Leichtbaumehrkosten von 2-18 € je eingespartem Kilogramm (Viehweger 2011). Dies ermöglicht den Einsatz von bislang in Großserienszenarien nicht wirtschaftlich einsetzbaren Leichtbautechnologien, wie z. B. Aluminium, Magnesium oder teilweise Faser-verbundkunststoff (FVK)-Bauweisen.

#### 4.1.2 Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit neuer Strukturbauweisen

Bei elektrifizierten Fahrzeugkonzepten wird in Bezug auf neue Gestaltungsmöglichkeiten durch geänderte Antriebsarchitekturen von „Conversion-“ und „Purpose-Design“ der Fahrzeugstruktur gesprochen. Die Frage, ob stark unterschiedliche Antriebsarchitekturen ohne Einschränkung der Sicherheit, des nutzbaren Raumes und des Fahrverhaltens in dasselbe Basisfahrzeug (Conversion-Design) eingebaut werden können oder ob es zur optimalen Erfüllung der oben genannten Anforderungen einer speziell auf den Antrieb angepassten Fahrzeugstruktur bedarf, wurde im Rahmen der AELFA-Workshops kontrovers diskutiert.

Eine Schwierigkeit in der beschriebenen Fragestellung ist, dass die Nutzung von Bauteilen in möglichst vielen Fahrzeugbaureihen ein wichtiges Instrument zur Optimierung der Kostenstrukturen ist (Automobilindustrie 2011). Beispielsweise sollen Bauteile des neuen modularen Querbaukasten (MQB) des Volkswagenkonzerns bis 2025 in rund 60 Modellen genutzt werden. Ziel ist es, die unterschiedlichen Fahrzeugmodelle mit 65-70% Gleichteilen mit Millionestückzahlen zu fertigen (Wittich 2011). Die heute im Karosseriebau am weitesten verbreitete Blechschalenbauweise, bei der umgeformte Bleche zusammengefügt werden, zeichnet sich durch schnelle Taktzeiten, aber hohe Werkzeuginvestitionen aus (SLC 2008b). Aus hohen Werkzeugkosten folgt im Rückschluss das Streben nach hohen Stückzahlen, was im MQB des Volkswagenkonzerns konsequent umgesetzt wird.

Die Entwicklung hin zu immer intensiver genutzten Baukastensystemen kann den Einsatz neuer Technologien verzögern oder verhindern. Neue Werkstofflösungen für Baukastensysteme müssen in der Lage sein, bestehende Lösungen ohne gravierende Änderungen der Anschlussmaße (modularer Baukasten) und des Montageprozesses zu substituieren.

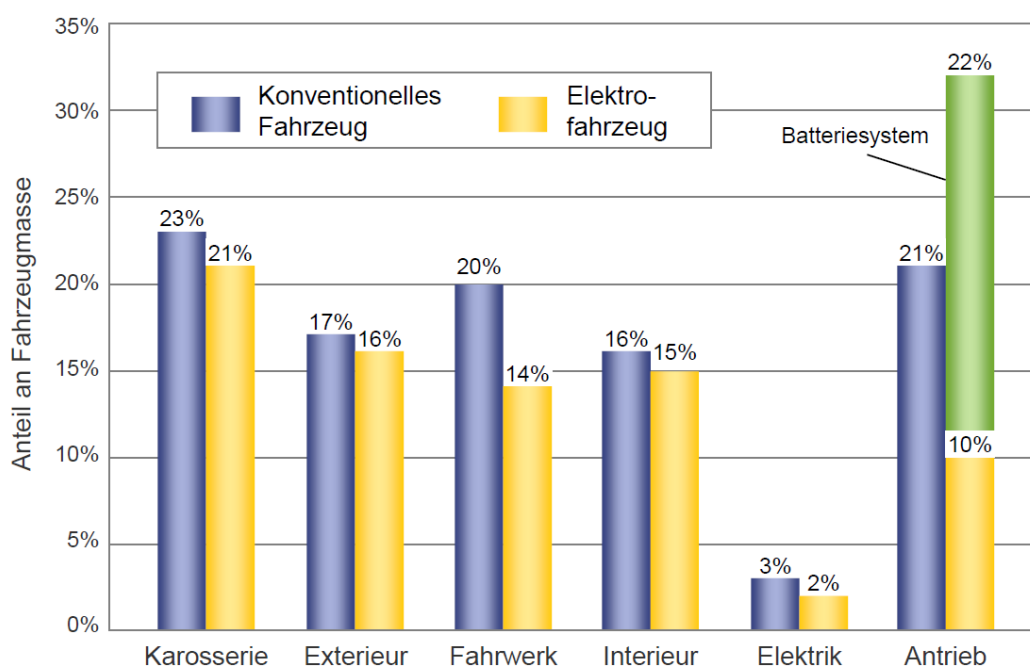
Zielt man auf ein Purpose-Design beispielsweise für ein batterieelektrisches Fahrzeug, so bedarf es Bauweisen und Technologien, welche Leichtbau und Fahrzeugsicherheit ermöglichen, ohne unvertretbar hohe Mehraufwände im Vergleich zu Baukastenlösungen zu verursachen.

#### 4.1.3 Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge

Die Erfüllung von Sicherheitsanforderungen, beispielsweise bezüglich der Stabilität einer Fahrgastzelle, wird von heutigen Automobilkunden als selbstverständlich vorausgesetzt. Europäische Fahrzeughersteller sind darauf bedacht Negativschlagzeilen in diesem sensiblen Bereich zu vermeiden. An zukünftige Fahrzeugkonzepte mit alternativen Antriebsarchitekturen werden ohne Einschränkungen dieselben Erwartungen gestellt.

Die Auslegung von Fahrzeugstrukturen im Hinblick auf das Crashverhalten wird stark von der Position des Antriebs im Fahrzeug und der Verteilung der Massen beeinflusst. Beim Großteil der konventionellen Fahrzeuge liegt der Hauptanteil der Massen der Antriebsaggregate vor der Fahrgastzelle. Bei Batteriefahrzeugen versucht man aus Sicherheitsgründen die Batteriemasse häufig in der Fahrzeugmitte und im Heck zu platzieren (Sachs 2011). Dies führt z. B. bei der Absorption der Energien bei einem Frontalunfall zu deutlich geänderten Anforderungen, so dass Anpassungen der Fahrzeugstruktur unumgänglich sind.

Daneben spielt die Art, die Größe und der Schutzbedarf für die Antriebskomponenten eine zunehmende Rolle bei der Strukturentwicklung alternativ angetriebener Fahrzeuge. In Abbildung 4.4 ist deutlich zu erkennen, wie die Massenanteile bei sich stark unterscheidenden Antriebsvarianten variieren. Die Anforderungen der passiven Sicherheit werden noch stärker als bisher zu einer relevanten Einflussgröße für Karosserie- und Plattformkonzepte der Fahrzeughersteller.



**Abbildung 4.4: Veränderung der Massenverteilung in Elektrofahrzeug gegenüber einem konventionell betriebenen Fahrzeug.**

Quelle: Eckstein (2010).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der sicherheitstechnischen Auslegung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen ist die Vermeidung sekundärer Unfallfolgen und die Gewährleistung der Sicherheit für Rettungskräfte. Hauptrisiko bei einem Unfall mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen ist, neben den Verletzungen beim eigentlichen Crash, die Brandgefahr durch austretenden Kraftstoff. Bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen kommt zusätzlich das Risiko hinzu, welches von hohen elektrischen Spannungen und möglichen chemischen Reaktionen, z. B. im Falle der Beschädigung der Batterie, ausgeht (NHTSA 2011). Bei wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen besteht neben der Berstgefahr von Hochdrucktanks das Risiko, dass sich im Falle von schweren Unfällen (z. B. Fahrzeug, welches von einem Zug erfasst wird) größere Mengen von zündfähigem Wasserstoff-Luft-Gemisch bilden, was zu Kettenreaktionen mit erheblichen Sekundärschäden führen kann.

Diese Risiken müssen vor einem breiten Einsatz dieser Technologien im Markt minimiert werden. Es bedarf Lösungen mit dem Ziel, nicht nur bestehende Crashnormen zu erfüllen, sondern darüber hinaus ein hohes Maß an Überlastsicherheit zu bieten, Rettungskräfte im Hinblick auf bestehende Gefahren zu schulen und Rettungskonzepte für denkbare Szenarien zu entwickeln.

#### 4.1.4 Ressourcenverfügbarkeit

Werkstoffe und deren Weiterentwicklungen waren und sind wichtige Faktoren für Innovationen.

Für leichtere und sichere Fahrzeugstrukturen werden beispielsweise besser umformbare Blechwerkstoffe und duktilere Gusslegierungen benötigt. Für den Korrosionsschutz gibt es einen gleichermaßen hohen Weiterentwicklungsbedarf. Eine Vielzahl werkstofftechnischer Weiterentwicklungen basiert auf dem Einsatz der sogenannten Seltenen Erden als Zusätze in metallischen Legierungen.

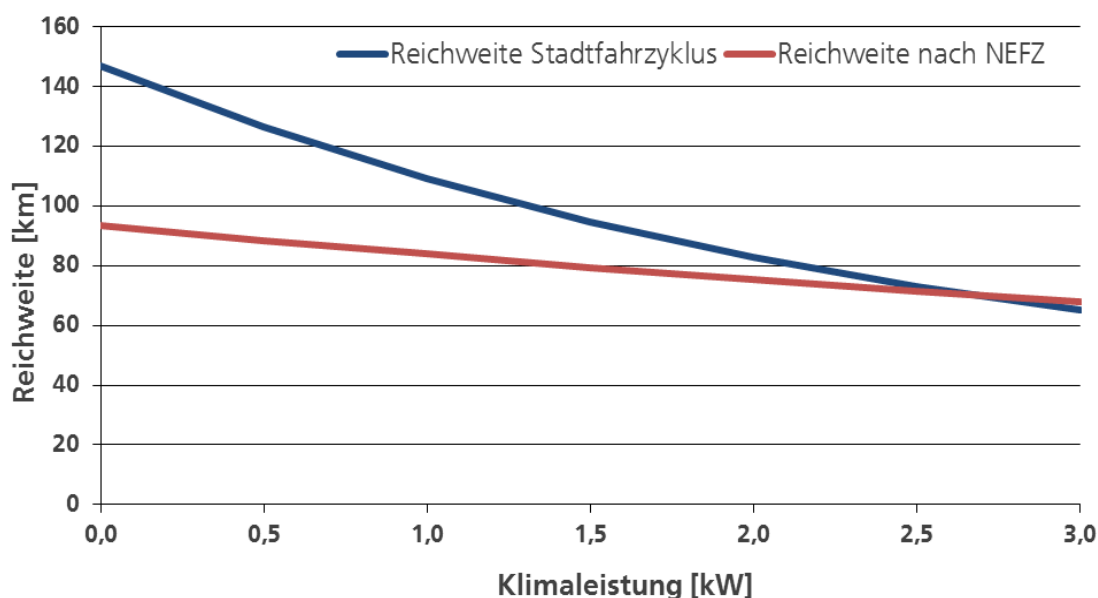
Durch eine marktbeherrschende Stellung Chinas bei diesen Seltenen Erden und dem im letzten Jahrzehnt enorm gewachsenen Rohstoffbedarf Chinas und anderen aufstrebenden Volkswirtschaften, wird sich die Rohstoffverfügbarkeit zu einem wichtigen Zukunftsthema entwickeln. Schon heute verbraucht China mehr als 50% des weltweit hergestellten Stahls (BGR 2009). Neben der wachstumsbedingten Verknappung besteht zusätzlich ein hohes Risiko der politisch bedingten Verknappung wichtiger Rohstoffe. Die staatliche Festlegung von reduzierten Förderquoten und die Ausfuhrbeschränkungen von Seltenen Erden seitens der Volksrepublik China zeigen das bestehende Risiko deutlich auf (FTD 2010; DERA 2011).

Bei der Wahl eines Werkstoffs für eine Anwendung wird deshalb zukünftig die Frage der langfristigen Werkstoffverfügbarkeit eine sehr wichtige Rolle spielen. Die Erforschung alternativer Werkstoffsysteme und die Erschließung alternativer Lieferquellen sind deshalb wichtige Bausteine für technologische Weiterentwicklungen.

#### 4.1.5 Fahrzeugklimatisierung

Der Schwerpunkt bei der Entwicklung von Heizungs- und Klimatisierungslösungen für Fahrzeuge lag bislang überwiegend auf der in Kapitel 5 näher beschriebenen Aggregateseite (Klimakompressor, Wärmetauscher, Zuheizung). Möglichkeiten, den Heiz- und Kühlbedarf durch Isolation der Fahrzeugstruktur zu reduzieren, wurden nachrangig betrachtet. Die designbedingte Vergrößerung von Fensterflächen und die häufig flache Frontscheibenanordnung verursacht tendenziell eine stärkerere Abkühlung und Vereisung im Winter und eine stärkere Aufheizung des Fahrzeugs im Sommer.

Im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen besteht bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Fahrzeugklimatisierung und der Fahrzeugreichweite (vgl. Abbildung 4.5). Vor Allem im für alternativ angetriebene Fahrzeuge besonders relevanten innerstädtischen Betrieb, verstärkt sich der Einfluss der Fahrzeugklimatisierung aufgrund der verringerten Fahrleistung pro Zeit deutlich. Zum Tragen kommt, dass die erforderliche Klimaleistung permanent (auch bei langsamer Fahrt oder in einem Stau) anfällt, während sich der für den Fahrbetrieb anfallende Energiebedarf in solchen Fällen reduziert.



**Abbildung 4.5:** Beispiel für die Veränderung der Reichweite eines Elektrofahrzeugs durch die Fahrzeugklimatisierung im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bei Vergleich zwischen dem kompletten Zyklus (blau) und dem innerstädtischen Anteil des Zyklus (orange).

Quelle: DLR.

Bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben bedarf es technischer Maßnahmen, um eine Fahrzeugaufheizung im Sommer und eine Auskühlung im Winter bestmöglich zu reduzieren. Auch wenn Fahrzeuge zukünftig die Möglichkeit einer netzgespeisten Vorkonditionierung (vgl. Kapitel 5.2) besitzen, gilt es, diese Energie bestmöglich im Fahrzeug zu halten. Die Fahrzeugklimatisierung wird deshalb einen relevanten Einfluss auf zukünftige Fahrzeugstruktur- und Verschleißkonzepte haben.

#### 4.1.6 NVH-Anforderungen

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge sind sehr leise und besitzen ein hohes Potential um verkehrsbedingten Lärm zu reduzieren. Innerhalb des Fahrzeugs ändern und erhöhen sich die Anforderungen im Bereich „Noise, Vibration, Harshness (NVH)“ durch die fehlenden Geräusche des Verbrennungsmotors und führen zu einer „Enttarnung“ bislang überdeckter Geräusche (Behrendt 2010). Durch die zukünftig verfügbaren stark unterschiedlichen Antriebskonfigurationen ergeben sich für die Geräuschdämmung wesentlich komplexere Randbedingungen. Parallelhybridfahrzeuge verfügen bereits über aufwändigere Geräuschdämmungskonzepte. Plug-In Hybride verfügen zwar über einen Verbrennungsmotor, doch ist dessen Geräusch durch den Betrieb in einem verbrauchsgünstigen Betriebspunkt von den fahrspezifischen Randbedingungen (aktueller Leistungsbedarf, Beschleunigen, Bremsen) entkoppelt. Bei Fahrzeugen mit Range-Extendern können möglicherweise neben dem Verbrennungsmotor alternative Energiewandler (z. B. Gasturbine, Freikolbenlinear-generator oder Wankelmotor) zum Einsatz kommen, wodurch sich die Komplexität für die Vibrations- und die Geräuschdämmung weiter erhöht.



Verschiebungen und Relevanzänderungen bei den zu dämpfenden Schwingungen (vgl. Abbildung 4.6) können Änderungen in den technischen Lösungsansätzen erforderlich machen.

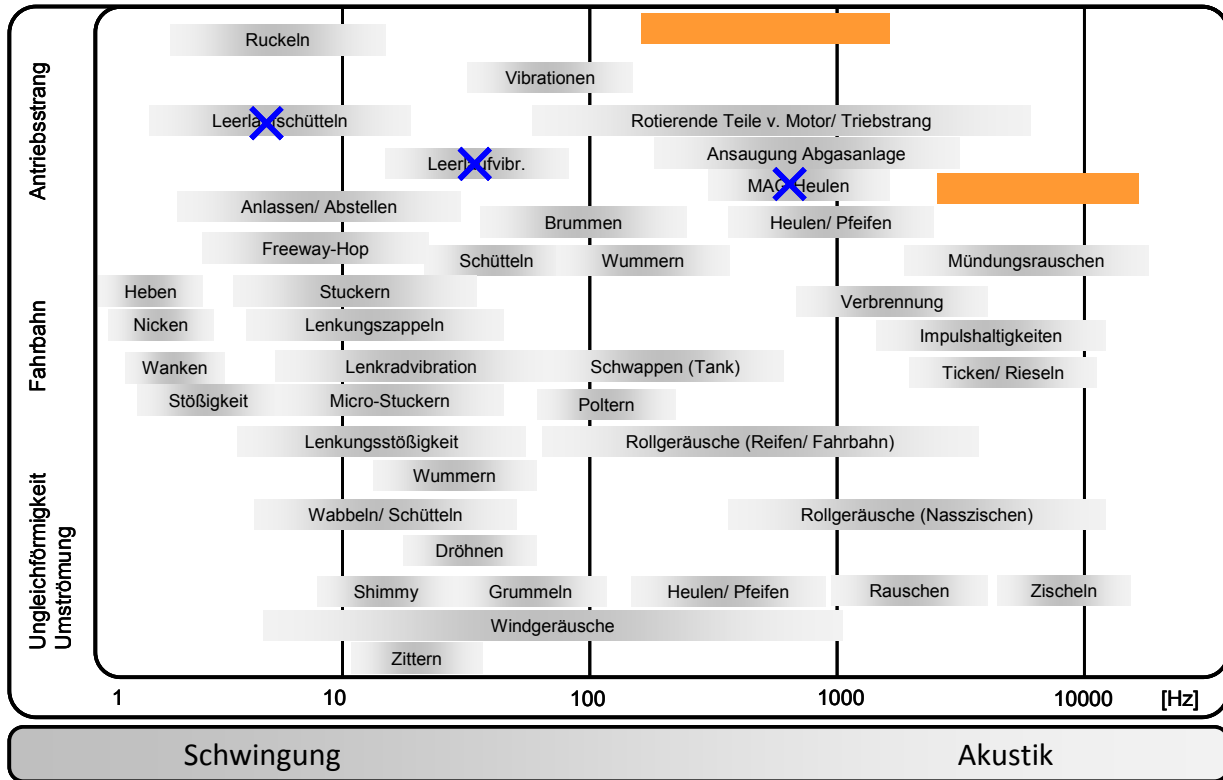


Abbildung 4.6: Herausforderungen im Hinblick auf NVH – Beispiele wegfallender (blau durchgestrichen) und zusätzlicher (orange Balken) Frequenzspektren.

Quelle: Behrendt (2010).

Auch wenn die oben beschriebenen Änderungen der Frequenzspektren ursächlich vom Antriebssystem abhängen, müssen die Aufgaben der Schalldämpfung von der Fahrzeugstruktur geleistet werden. Aus diesem Grund wird das NVH-Verhalten alternativ angetriebener Fahrzeuge zu einem Impulsgeber für fahrzeugstrukturelle Anforderungen. Vergleichbar dem unter 4.1.5 beschriebenen Bedarf der Strukturisolierung entsteht die Notwendigkeit nach neuen strukturintegrierten Dämpfungsmöglichkeiten zu suchen.

Möglicherweise verbessern Lösungen zur thermischen Isolierung analog die akustische Dämmung. Um Synergieeffekte zu nutzen bedarf es jedoch einer verstärkten fachübergreifenden Zusammenarbeit von Experten der Strukturauslegung, des Thermomanagements und der NVH-Auslegung.

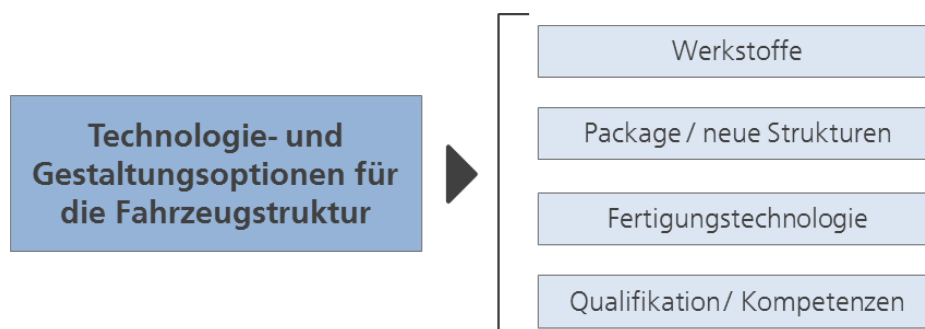
Die unter 4.1.1 beschriebenen Ziele, die Fahrzeugmasse zu reduzieren, verstärken den Bedarf zur Entwicklung ganzheitlicher Fahrzeugstrukturlösungen zusätzlich. Der Grund sind die im Gegensatz zu konventionellen Stahlbauweisen fehlende Erfahrung bei alternativen Leichtbauwerkstoffen an vielen Stellen der Entwicklungskette (Auslegung, Simulation, Werkstoffkennwerte).

#### 4.1.7 Kundenwunsch und Kundenakzeptanz

Neben den technologischen Impulsgebern spielt beim Markteintritt neuer Technologien die Kundenakzeptanz eine wichtige Rolle. Schwerpunkt dieses Aspektes ist das Gesamtfahrzeugkonzept. Es ist jedoch ein Trend erkennbar, dass Automobilhersteller die Fahrzeugbauweise und den Leichtbau vermehrt für Marketingzwecke nutzen, um den Kunden durch ein „Green oder High-Tech-Image“ zu begeistern (vgl. z. B. BMW (2011)). Galten Fortschritte in der Karosserietechnologie bislang als dem Kunden schlecht vermittelbar, werden in Zukunft die für den Kunden nicht direkt sichtbaren Eigenschaften der Fahrzeugstruktur als innovative Bestandteile eines neuen Mobilitätsverständnisses vermarktet. Das bedeutet, dass zukünftige Fahrzeugstrukturen unabhängig von der technologischen Sinnhaftigkeit zukünftig vermarktungsrelevante Gestaltungsmerkmale bis hin zu Aufpreis pflichtigen Karosserieoptionen enthalten könnten. Die verstärkte Kundenwahrnehmung der Themen Fahrzeugstruktur und Leichtbau kann positiver Impulsgeber für die Entwicklung innovativer Karosseriebauweisen und der Implementierung neuer Technologien in die Fahrzeugstruktur sein.

### 4.2 Technologie- und Gestaltungsoptionen für die Verbesserung von Strukturen zukünftiger alternativ angetriebener Fahrzeuge

Die vorangegangene Betrachtung relevanter Impulsgeber führt zu der Fragestellung, mit welchen Technologien, Bauweisen oder Strategien Verbesserungen im Bereich der Fahrzeugstruktur alternativ angetriebener Fahrzeuge möglich werden. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Handlungsfelder, gegliedert in die Bereiche Werkstoffe, Bauweisen, Fertigungstechnologien und Kompetenzen (vgl. Abbildung 4.7), beschrieben. Teile der darin adressierten Gesichtspunkte wurden im Rahmen der im Herbst 2010 durchgeführten AELFA-Expertenworkshops identifiziert.



**Abbildung 4.7: Übersicht über die betrachteten Schwerpunktthemen.**

#### 4.2.1 Werkstoffe

Die Werkstoffforschung und -entwicklung leistet schon immer einen großen Beitrag für die Innovationsfähigkeit Deutschlands (Schavan 2007). Für die Zukunft liegt hierin ein wichtiger Handlungsschwerpunkt, um zukünftigen technologischen Herausforderungen zu begegnen. Entwicklungen in diesem Bereich erfordern allerdings oftmals ein hohes Maß an Durchhaltevermögen. Beispiele hierfür sind die Faserverbundkunststoffe, bei denen noch erhebliche Entwicklungen im Bereich der Vorhersage der dynamischen Bauteileigenschaften erforderlich sind. Im Folgenden werden zukünftig relevante Werkstoffe oder

Werkstoffkombinationen und fachübergreifende Fragestellungen wie das Recycling beschrieben und wichtige Herausforderungen erläutert.

## Faserverbundkunststoffe

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung der Fahrzeugmasse
- Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- Kundenwunsch und Kundenakzeptanz

Die erste Generation von Elektrofahrzeugen wird Faserverbunde bereits intensiver nutzen als heutige konventionelle Fahrzeuge. Insbesondere das oben beschriebene Ziel der Massereduktion führt zu diesem Trend. Hochleistungsfaserverbunde ermöglichen gegenüber Stahlbauweisen bei vergleichbaren Struktureigenschaften bis zu 70% Gewichtseinsparpotential (bei ausschließlich einachsigen Belastungsfällen). Gegenüber Aluminium besteht je nach Auslegungslastfall ein Potential von ca. 30-50%. Haupteinsatzgebiete von Faserverbundbauweisen in Fahrzeugen waren bislang vor Allem der Motorsport und Kleinserien von Hochleistungssportwagen. In diesen Segmenten war der Einsatz von Faserverbunden trotz hoher Einzelteilkosten in der Gesamtsicht aus Investition, Produktivität und Teilepreis eine wirtschaftlich und technisch attraktive Leichtbauweise. Der angestrebte Einsatz von Faserverbunden in größeren Bauteillosen erfordert erhebliche Weiterentwicklungen des Faser- und Bauteilherstellprozesses. Kooperationen von Fahrzeugherstellern mit Faser- und Matrixherstellern (AP 2011), Kompetenznetzwerke wie das CFK-Valley in Stade<sup>4</sup> und des Carbon Composites e.V. (CCeV)<sup>5</sup> zeigen, dass diese Herausforderungen erkannt und in Bearbeitung sind. Nicht unerwähnt bleiben darf, dass sich die Strategien zum Einsatz von Faserverbunden zwischen unterschiedlichen Fahrzeugherstellern stark unterscheiden. Durst (2011) beispielsweise empfiehlt eine sehr gezielte lokale Anwendung von Faserverbunden. Baukastensysteme wie das FlexBody-Konzept (flexbody.net) und das am DLR entwickelte „Stuttgarter Modell“ des faserverbundintensiven Leichtbaus (Friedrich et al. 2009) in Form einer sogenannten Spant-Space-Frame-Bauweise setzen auf den gezielten lokalen Einsatz dieses Hochleistungswerkstoffes. Fahrzeuge wie der BMW-i3 sehen dagegen einen sehr großflächigen Einsatz von Faserverbunden vor (BMW 2011).

Eine große Herausforderung ist die Entwicklung und Bereitstellung automobiltauglicher Entwicklungsmethoden. Forschungsbedarf besteht insbesondere in der dynamischen Simulation des Versagensverhaltens von Faserverbundbauteilen. Während sich metallische Bauteile bei einem Aufprall stark verformen, setzt sich das Versagensverhalten bei Faserverbunden aus einer Mischform unterschiedlicher Versagensmodi (Crushing, lokales Beulen, Delamination) zusammen. Heute in Hochleistungsanwendungen eingesetzte Energieabsorber sind darauf ausgelegt sehr definierte Belastungen in einer Vorzugsrichtung aufzunehmen. Dagegen werden typische Karosserieteile im Falle eines Unfalls in der Regel mehrachsig belastet. Die Vorhersage solcher komplexer Lastfälle in der Crashsimulation bedarf intensiver Forschungsanstrengungen und einer Vielzahl von begleitenden Versuchsreihen.

---

<sup>4</sup> [www.cfk-valley.com](http://www.cfk-valley.com)

<sup>5</sup> [www.carbon-composites.eu](http://www.carbon-composites.eu)



**Abbildung 4.8:** Teile des FlexBody Modulbaukastens ([flexbody.net](http://flexbody.net)) (links) und DLR-Spant-Space-Frame-Bauweise (rechts) mit Faserverbundringspannen im A-, B- und C-Säulenbereich.

Quelle: Friedrich et al. (2009).

Neben den Kenntnissen über das Versagensverhalten im Unfall, bedarf es eines Verständnisses des Alterungs- bzw. Schädigungsverhaltens im Betrieb und Methoden zur Schadenserkennung in der Wartung. Die Schadensdetektion bei Faserverbundkunststoffen ist auf Grund der zum Teil nicht sichtbaren Schadensformen nicht mittels optischer Verfahren durchführbar. Die Betriebsfestigkeit von Strukturbauteilen aus FVK muss trotzdem gewährleistet werden. Aufgrund dessen müssen Verfahren entwickelt werden welche materialspezifischen Versagensformen kostengünstig detektieren können. Im Gegensatz zu metallischen Bauteilen, bei denen Beschädigungen äußerlich, z. B. in Form von Beulen oder Falten sichtbar sind, ist eine äußerliche Sichtbarkeit von Schäden bei FVK nur im Fall stärkerer Beschädigungen zu erwarten. Delaminationen oder durch Langzeitbelastungen beeinträchtigte Faser-Matrix Übergangsbereiche sind typische Lokalversagensformen, welche oftmals außerhalb des sichtbaren Bereiches liegen und welche durch bisher aufwändige und kostenintensive Verfahren detektiert werden müssen. Die Entwicklung kostengünstiger und automobiltauglicher Verfahren ist erforderlich.

Entwicklungsbedarf besteht gleichermaßen bei den Faserverbunden mit thermoplastischer Matrix, welche gegenüber den Hochleistungsfaserverbunden mit duromerer Matrix eine kostengünstigere Bauteilherstellung, teilweise größere Produktionsvolumen (z. B. LFT, Organobleche) und eine deutlich günstigere Recyclingbarkeit aufweisen. LFT-Bauteile besitzen aufgrund der eingesetzten Faserlängen deutlich geringere mechanische Eigenschaften als endlosfaserverstärkte Kunststoffe (Geiger 2005). Nachteilig bei den Organoblechen ist die begrenzte Beeinflussung der Faserorientierung auf Grund der Verarbeitung standardisierter Halbzeuge. Lösungsansätze bestehen bei LFT-Bauteilen im sogenannten Tailoring, also dem gezielten Einsatz von Endlosfasern in den Last-Vorzugsrichtungen derartig hergestellter Bauteile. Bei Organoblechen gibt es Entwicklungen zum laserunterstützten Ablegen thermoplastischer Bänder (IPT 2010). Eine Herausforderung besteht wiederum in der Fähigkeit, mit diesen für den effektiven Materialeinsatz günstigen Verfahren entsprechende Großserienstückzahlen herzustellen.

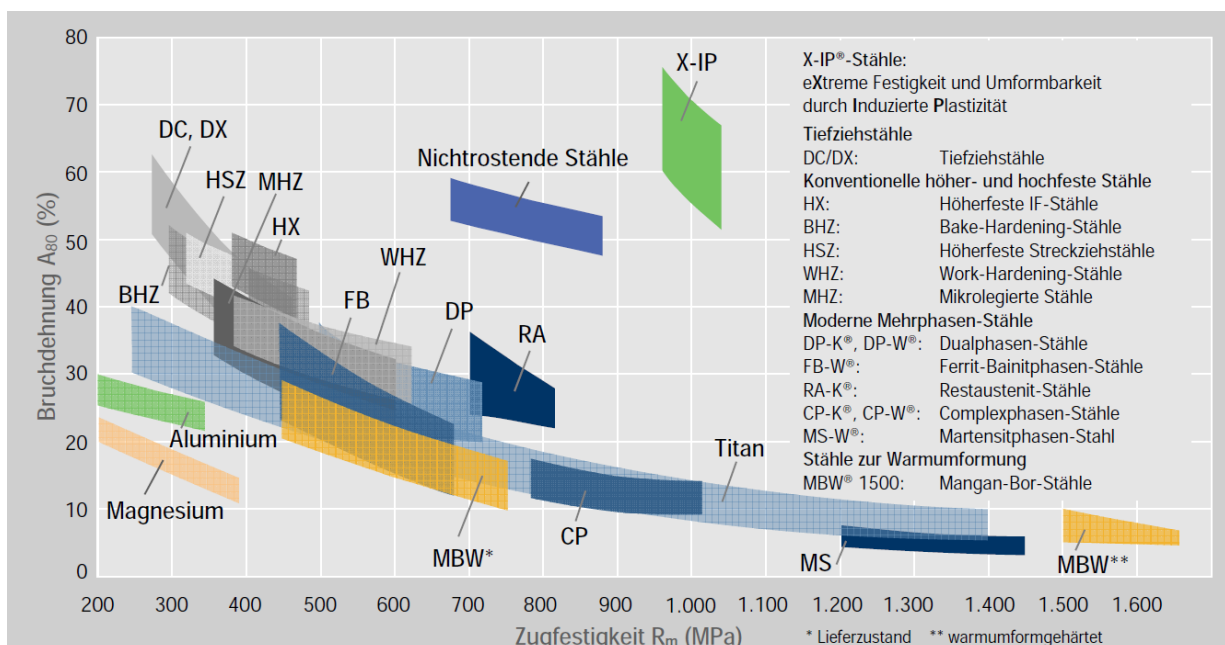
Um Faserverbunde sinnvoll für Leichtbau und Sicherheit im Fahrzeug einzusetzen, bedarf es einer sorgfältigen Analyse der besonders geeigneten Anwendungen. Technologische Herausforderungen sind die Entwicklung von Großserienproduktionstechnologien, die Simulationsmethoden für die Bauteilentwicklung, die sichere Schadensdetektion und das Recycling. Neben den oben ausführlicher beschriebenen Aspekten besteht die mittelfristige Notwendigkeit alternative, nicht erdölbasierte Matrixsystemen, z. B. durch die Erforschung und Entwicklung geeigneter Biopolymere, bereitzustellen.

## Hochfeste Stahllegierungen

Adressierte Impulsgeber:

- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge

Bei Stahllegierungen bestand über lange Zeit die Annahme, dass zwischen dem Umformvermögen und der Festigkeit ein reziproker Zusammenhang besteht. Neuere Legierungsentwicklungen durchbrechen diesen Zusammenhang. So wurden in den letzten Jahren hochfeste Stahlsorten mit hoher Duktilität entwickelt. Abbildung 4.9 zeigt eine Übersicht gängiger Stahlwerkstoffe, wobei die erwähnten neueren TWIP- oder X-IP-Stahlsorten deutlich von der im Dehnungs-Festigkeitsschaubild zu erkennenden, bislang als „Stahlbanane“ bezeichneten Trendlinie, abweichen.



**Abbildung 4.9: Eigenschaften moderner Stähle und anderer Werkstoffe.**

Quelle: Dahlmann (2009).

Diese Werkstoffe eröffnen grundsätzlich die Möglichkeit im Herstellprozess auf energieintensive Heißumformverfahren zu verzichten. Ein Serieneinsatz dieser Stähle steht dennoch aus. Die für das Bauteil erwünschten guten Werkstoffeigenschaften verändern sich teilweise mit der Zeit (z. B. kann es bei umgeformten Werkstoffen zu sogenanntem „delayed fracture“ kommen (Gu et al.)). Daneben reagieren diese Stahlsorten empfindlich auf Verunreinigungen im Herstellprozess, wodurch es zu höheren Materialkosten im Vergleich zu konventionellen Stählen kommt. Die Auslegung von Bauteilen mit derartigen Stählen ist aufgrund der zu berücksichtigenden starken Rückfederung des Werkstoffs nicht einfach. Über die Einsatzmöglichkeiten und die Zukunft dieser Stähle gibt es unter Experten sehr unterschiedliche Meinungen. Ohne eine Lösung für die oben beschriebenen Phänomene bereitzustellen werden automobiltechnische Anwendungen nicht umsetzbar.

Benötigt man in einem Bauteil höchste Festigkeiten, so sind die heute schon in der Anwendung befindlichen Bor-Mangan-Stähle ohne erkennbare Alternative. Verfahrenstechnische Weiterentwicklungen, wie

z. B. das Tailored Tempering eröffnen diesen Stählen erweiterte Einsatzmöglichkeiten (Winterhagen 2009). Der heute für die Bor-Mangan-Stähle eingesetzte Presshärtungsprozess (Abbildung 4.10) hat den Nachteil des zusätzlichen Energiebedarfs. In diesem Prozess können jedoch komplexe Bauteilformen ohne nennenswerte Rückfederung hergestellt werden, wodurch dieses Verfahren bei Konstrukteuren und Qualitätsverantwortlichen beliebt ist.



**Abbildung 4.10: Glühende Blechplatte in einem Presshärtwerkzeug.**

Bildquelle: de.apgroup.com

Stahl bietet als Werkstoff nach wie vor Verbesserungspotential. Die Legierungsentwicklung, verbunden mit der Untersuchung von mechanischen Eigenschaften, Alterung, Korrosion, usw. ist aufwändig. Die erreichten Festigkeitssteigerungen bei Stählen führen zu immer neuen Herausforderungen im Bereich der Ver- und Bearbeitung derartiger Werkstoffe. Der Verschleiß von Umform- und Schneidwerkzeugen kann sich hierdurch deutlich erhöhen. Für eine wirtschaftliche Bauteilherstellung bedarf es begleitender Entwicklungen im Bereich verbesserter Werkzeugstähle und Beschichtungen.

### **Neue Aluminium- und Magnesiumlegierungen**

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung der Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit

Neben den in den letzten Jahren aufgezeigten werkstofftechnischen Verbesserungen bei Stählen ist es im Bereich der Aluminium- und Magnesiumlegierungen gleichermaßen gelungen, deutliche Eigenschaftsverbesserungen zu erzielen (HZG 2001; Beeh et al. 2011). Der Wettbewerb der Leichtbaumaterialien führt wiederholt zum Anstoß neuer Weiterentwicklungen. Viele Innovationen sind im Stahlbereich durch den Wettbewerb mit beispielsweise Aluminium angestoßen worden.

Eigenschaftsverbesserungen durch Legierungsentwicklung ermöglichen dem Werkstoffen Aluminium und zukünftig möglicherweise verstärkt Magnesium immer wieder neue Anwendungen. Je nach Anforderungen können mit diesen Werkstoffen gegenüber Stahl zwischen 40 und 60% Masse eingespart werden.

Herausforderungen liegen bei diesen Werkstoffen in der Entwicklung und fachgerechten Nutzung geeigneter Verbindungstechnologien und Beschichtungen zum Korrosionsschutz. Vergleichsweise schwierig ist eine



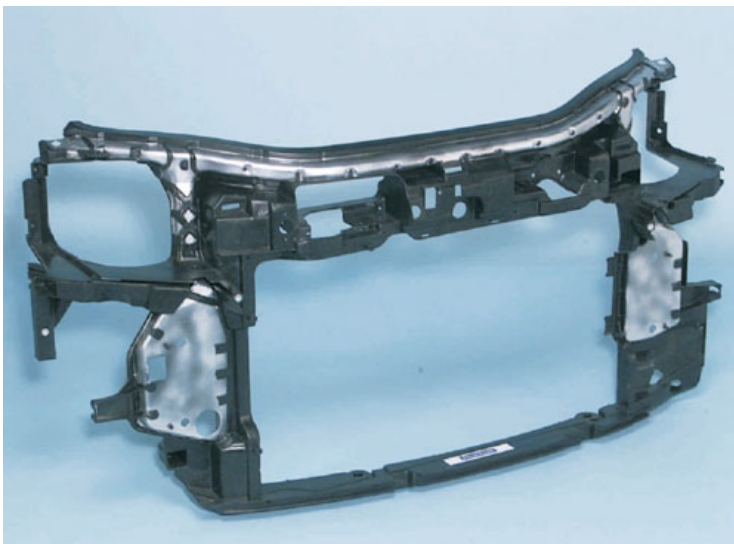
präzise Vorhersage der Komponenteneigenschaften in der numerischen Simulation. Simulationsergebnissen weichen beispielsweise in der Crashberechnung häufig stärker von der Realität ab, als bei Stahlwerkstoffen.

### Metallische und Polymere Hybride

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung der Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit

Im Gegensatz zum weiter unten angesprochenen großen Feld des Multi-Material-Designs (MMD) sollen in diesem Abschnitt Hybridbauweisen aufgeführt werden, welche bereits im Einzelteil über die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe verfügen. Potentiale derartiger Bauweisen sind heute in Serienapplikationen, wie z. B. dem hybriden Mg/Al-Kurbelgehäuse (Landerl 2004) oder in hybriden Stahl-Kunststoff Front-End-Modulen (vgl. Abbildung 4.11) zu finden.



**Abbildung 4.11: Frontend-Träger des Audi A2 in Hybridbauweise.**

Quelle: Malnati (2008).

Hybride Bauweisenkonzepte beinhalten das Potential, Leichtbauteile einfacher in bestehende Bauweisen zu integrieren und adressieren dabei stark die Impulsgeber Stückzahlfähigkeit und Kostenattraktivität. Seit einigen Jahren werden beispielsweise Aluminium Gussteile (z. B. Federbeindom) in stahlintensiven Großserienkarosserien eingesetzt. Schwierigkeit hierbei ist die aufwändige Fügetechnik und der benötigte Korrosionsschutz. Hybridbauteile besitzen das Potential, Leichtbauweisen neue Anwendungsgebiete zu erschließen, weil beispielsweise werkstofftechnisch angepasste Fügeflansche bereits im Bauteilherstellungsprozess (Druckgießen von Leichtmetallen, Spritzgießen von Kunststoffen) eingebracht werden können. Der Einsatz vereinfachter Fügetechniken wird dadurch ermöglicht und Leichtbauweisen können einfacher und mit geringerem technologischen Risiko in laufende Serien einfließen.

Ein weiteres sinnvolles Einsatzgebiet von Hybridlösungen liegt in der lokalen Verstärkung von Leichtbauteilen. Leichten Werkstoffen können demzufolge neue Anwendungsbereiche erschlossen werden, wenn in konventioneller Leichtbauweise eine Lösung nicht realisierbar wäre (z. B. wegen Lebensdauer oder Überlastfällen).



Wie bei allen Verbundwerkstofflösungen liegt eine große Herausforderung dieser Technologien im Recycling der eingesetzten Werkstoffe. Stahleinleger oder -flansche aus Kunststoff- oder Leichtmetallteilen müssen beispielsweise entfernt werden, um eine sortenreine Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Hier gilt es, die Tauglichkeit heutiger Recyclingverfahren (z. B. Schreddern) näher zu untersuchen.

### **Nachwachsende Rohstoffe**

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung der Fahrzeugmasse
- Ressourcenverfügbarkeit
- Fahrzeugklimatisierung
- Kundenwunsch und Kundenakzeptanz

Nachwachsende Rohstoffe werden in Fahrzeugprimärstrukturen bislang nicht eingesetzt. Anwendungen beschränken sich meist auf Verkleidungs- oder Ablagefunktionen. Die Frage der Ressourcenverfügbarkeit und der Kundenakzeptanz bietet möglicherweise Potentiale, nachwachsende Rohstoffe in beschränktem Umfang in strukturellen Anwendungen zum Einsatz zu bringen. Neben den schon besser untersuchten Naturfasern bietet der außerordentlich leichte und trotzdem ausreichend feste Werkstoff Holz in vielen Fällen theoretische Potentiale (Hertrampf 2009), um andere Werkstoffe zu ersetzen und das Werkstoffspektrum zu ergänzen. Neben den mechanischen Eigenschaften könnten die Dämmungs- und Dämpfungseigenschaften nachwachsender Werkstoffe zu neuen Anwendungsgebieten führen.

Die Industrialisierung der Automobilproduktion hat mit engen Prozess- und Toleranzfenstern zu einer nahezu vollständigen Verdrängung nachwachsender Strukturwerkstoffe geführt. Der zunehmende Druck, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern, könnte holzbasierten Werkstoffen neue Chancen eröffnen, da diese im Gegensatz zu industriell hergestellten Werkstoffen CO<sub>2</sub> „speichern“ und während der Fahrzeuglebensdauer dem natürlichen Kreislauf entziehen.

### **Rezyklierbarkeit von Werkstoffen**

Adressierte Impulsgeber:

- Kostenreduktion
- Ressourcenverfügbarkeit

Das Recycling von Werkstoffen bietet hohes Potential zur Reduktion von Rohstoffverbrauch und Emissionen. Eine Mehrfachnutzung bzw. Wiederverwertung von Materialien ist grundsätzlich vorteilhaft. Die Materialeigenschaften verschlechtern sich bei Sekundärwerkstoffen häufig gegenüber weniger verunreinigten Primärwerkstoffen.

Faserverbundmaterialien bergen auf Grund ihrer multimateriellen Zusammensetzung (Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern in Kombination mit einer Kunststoffmatrix) eine hohe Herausforderung im Bereich der Recyclingfähigkeit. Die Fasern, welche in eine meist duroplastische Matrix eingebettet sind, können nach heutigem Verfahrensstand nur durch aufwändige Pyrolyse aus der Matrix herausgelöst werden. Die wirtschaftliche und ökologische Tragfähigkeit dieses Ansatz zur Wiederverwertung von Fasern scheint fraglich. Allein thermoplastische Matrixsysteme bieten die Möglichkeit der Trennung von Fasern und Matrix. Die hierzu benötigten Verfahren sind allerdings zeit-, energie- und kostenintensiv, wodurch die Rezyklierbarkeit

bisher fast ausgeschlossen werden kann. Außerdem kann eine Schädigung der Fasern und eine damit verbundene Festigkeitseinbuße nicht ausgeschlossen werden. Ein gängiges Verfahren ist das Zerkleinern von Faserverbundkunststoffbauteilen bei deren Entsorgung. Aus den hieraus resultierenden Kurzfasernprodukten können neue Bauteile gefertigt werden, welche geringeren Anforderungen genügen und in ihren eigenschaftsspezifischen Einsatzmöglichkeiten sehr begrenzt sind.

Bei Aluminium und Magnesium sind die Herstellungsprozesse sehr energieintensiv. Ungünstig ist die Anwendungen derartig hergestellter Werkstoffe in stationären Bereichen oder in Industrieprozessen anstatt in mobilen Einsatzgebieten. Der direkte Umwelt- oder Verbrauchsreduktionsnutzen entfällt. Beispiel hierfür ist der Einsatz von Magnesium in der Stahlherstellung oder als Legierungselement für Aluminium. Ein erheblicher Anteil der weltweiten Magnesiumproduktion fließt in derartige Prozesse (vgl. Abbildung 4.12).

Sekundärmagnesium, welches das wertvolle Primärmagnesium in solchen Anwendungen ersetzen soll, ist bislang nicht in relevantem Umfang verfügbar.

Eine wichtige Handlungsoption besteht aus diesem Grund in der Nutzung derartiger Primärwerkstoffe in mobilen Anwendungen. Wichtig ist des Weiteren der Ausbau von Recyclingsystemen, so dass beispielsweise verbaute Magnesiumteile am Ende der Nutzungsphase wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden.

Eine weitere Möglichkeit, Ressourcen zu schonen, ist der Ersatz von Primärwerkstoffen durch Sekundärwerkstoffe. Durch Verunreinigungen erreichen Sekundärlegierungen häufig nicht vergleichbar gute Werkstoffeigenschaften wie die Primärlegierungen, deren Zusammensetzung präziser eingestellt und gesteuert werden kann. Für einen energetisch optimalen Werkstoffeinsatz wäre die Einführung von Anforderungsklassen bei unterschiedlichen Werkstoffanwendungen ein möglicher Schritt, um Recycling-/Sekundärlegierungen stärker zum Einsatz zu bringen. Beispielsweise könnte zwischen Anwendungen mit hohen (z. B. Karosseriebauteile, Luftfahrtbauteile etc.) und niedrigen Anforderungen (Laptop-Gehäuse, Koffer, teilweise Gebäudeanwendungen etc.) unterschieden werden und Empfehlungen für den Einsatz von Primär- und Sekundärlegierungen gegeben werden.

Im Bereich der Stahlwerkstoffe besteht ein etablierter und funktionierender Recyclingkreislauf. Trotzdem wird bei höherwertigen Stahlgütern ein hohes Maß an stofflicher Reinheit und genauer Legierungseinstellung benötigt. Auch hier kommt es in vielen Fällen statt zu einem Recycling zu einem Downcycling der Werkstoffe.

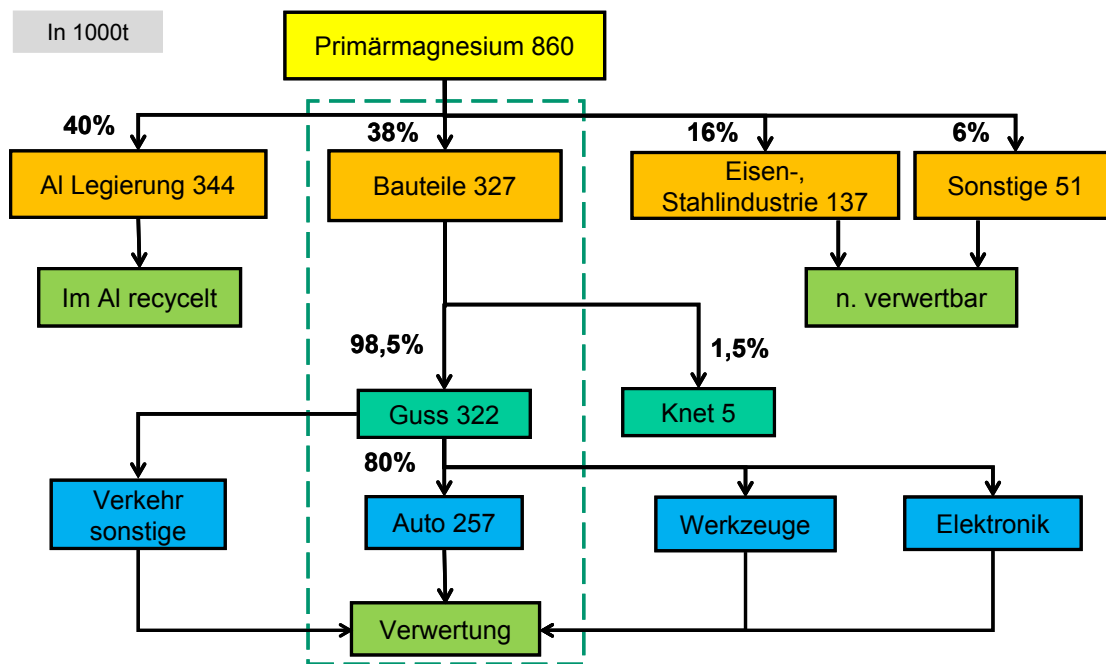


Abbildung 4.12: Übersicht über die Verwendung von Primärmagnesium.

Quelle: Meyer (2011).

#### 4.2.2 Bauweisen

##### Multi Material Design

Adressierte Impulsgeber:

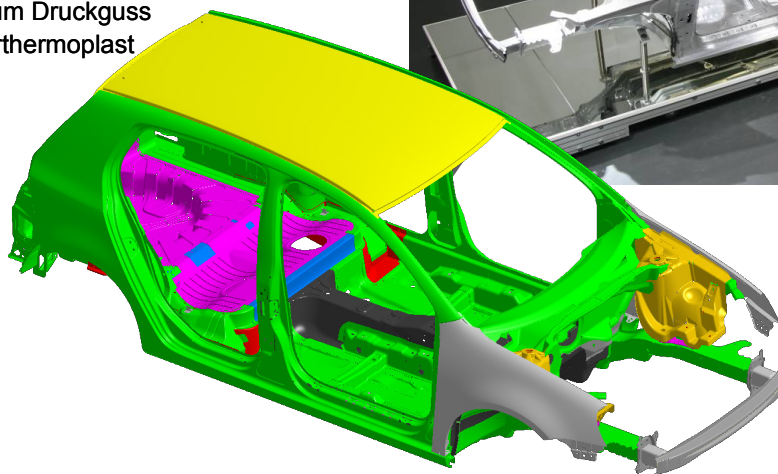
- Reduzierung des Fahrzeugmasse
- Kostenreduktion und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- Ressourcenverfügbarkeit
- Fahrzeugklimatisierung
- NVH-Anforderungen
- Kundenwunsch und Kundenakzeptanz

Der passende Werkstoff, eingesetzt an der jeweils richtigen Stelle in der Fahrzeugstruktur und hergestellt in einem für die angestrebte Stückzahl kostenoptimalen Fertigungsverfahren eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten, den in Kapitel 4.1 beschriebenen Impulsgebern technologisch zu begegnen. Im sogenannten Multi-Material-Design (MMD) verfolgt man das Ziel, die Stärken einzelner Werkstoffe und Verfahren zu neuen, verbesserten Bauweisen zu kombinieren. Ein Beispiel für eine Fahrzeugstruktur in Multi-Material-Design zeigt Abbildung 4.13. Im von der Europäischen Union geförderten Projekt Super-Light Car wurden

die Möglichkeiten der MMD-Bauweise eindrucksvoll aufgezeigt. Die Masse einer Fahrzeugstruktur mit einem Produktionsvolumen von 1000 Einheiten pro Tag wurde durch intelligenten Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe gegenüber einer Stahl-Referenzstruktur um 35% (100 kg) reduziert. Durch die Kombination unterschiedlicher Bauweisen gelang es, die Leichtbaumehrkosten unter einem Durchschnittswert von 8 € pro eingespartem Kilogramm Masse zu halten (SLC 2008a).

### Materialien

- Aluminium Blech
- Aluminium Guss
- Aluminium Strangpress
- Stahl
- Warmgeformter Stahl
- Magnesium Blech
- Magnesium Druckguss
- Glasfaserthermoplast



**Abbildung 4.13: Super-Light Car-Karosserie in Multi-Material Design, unten CAD Model, rechts oben Demonstrator.**

Bildquelle: SLC-Projekt.

Die Kombination mehrerer Werkstoffe zu einer Gesamtstruktur birgt eine Vielzahl von zu lösenden Aufgabenstellungen:

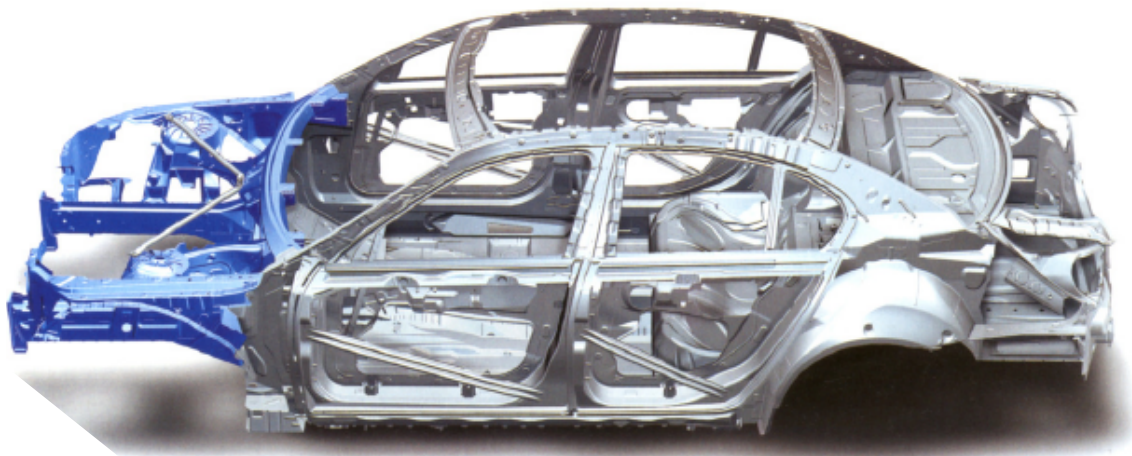
Das **Verbinden** unterschiedlicher Werkstoffe erfordert geeignete Fügeverfahren. Das bei Stahlkarosserien eingesetzte Schweißen kann in der Regel nicht angewendet werden. Mechanische Fügeverfahren wie das Stanznieten, das Fließformschrauben (FDS), das Clinchen, das Hochgeschwindigkeitsbolzensetzen und das Blindnieten eignen sich bedingt, um unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu verbinden. Wichtiges Kriterium bei der Anwendung dieser Verfahren ist die Gewährleistung des Korrosionsschutzes an der Verbindungsstelle. Die in der Regel metallischen Verbindungselemente bilden mit den gefügten Werkstoffen ein chemisches „Lokalelement“, an welchem galvanische Korrosion entstehen kann. Eine Verbindungstechnik mit hohem Potential für MMD-Strukturen ist das Kleben. Gelingt es, eine gute und beständige Anbindung zwischen Grundwerkstoff oder Oberflächenschutzsystem mit einem Klebstoff herzustellen, so lassen sich klebetechnisch beliebige Werkstoffe miteinander fügen. Risiken beim Kleben bestehen z. B. durch thermische und mechanische Alterung der Klebung, durch ungeeignete mechanische Belastung der Klebestelle (Schälung statt Schubbelastungen), durch Spaltkorrosion bei ungeeigneten Korrosionsschutzmaßnahmen und durch schwierig einzuhaltende Klebespalttoleranzen.

Der **Korrosionsschutz** für MMD-Strukturen ist verglichen mit Bauweisen aus einem Werkstoff wesentlich schwieriger. Beschichtungssysteme müssen kompatibel zu mehreren Werkstoffen sein, sollen aufwändige Vorbeschichtungen einzelner Strukturkomponenten vermieden werden. Darüber hinaus bedarf es häufig konstruktiver Maßnahmen, um MMD-Strukturen nachhaltig vor Korrosion zu schützen. Beim Einsatz von Magnesiumussteilen in strukturellen Anwendungen beispielsweise wird die Gestalt der Bauteile so ausgelegt, dass Schmutz- und Feuchtigkeitsnester vermieden werden (Friedrich et al. 2008b).

In der **Auslegung** von MMD-Strukturen müssen unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Werkstoffe berücksichtigt werden. Die durch Wärmedehnung entstehenden Spannungen belasten insbesondere die Fügestellen. Beispielsweise können Klebungen durch Temperaturschwankungen stark belastet werden und versagen.

Die **numerische Simulation** von MMD-Strukturen erfordert realitätsnahe Materialmodelle, die häufig nicht in der erforderlichen Qualität vorliegen. Die Generierung von Materialkarten mit Hilfe von Versuchsreihen ist aufwändig und teuer. In der Verbindungstechnik kann das Leichtbaupotential von Klebeverbindungen aufgrund ungenauer Berechnungsmodelle häufig nicht genutzt werden.

Heutige Serienkarosserien weisen noch nicht den Komplexitätsgrad eines Super-Light Car auf. Sie bestehen aus wenigen, möglichst großen stoffreinen Modulen, welche an wenigen, einfacher zu beherrschenden Schnittstellen verbunden sind (vgl. Abbildung 4.14).



**Abbildung 4.14: Modulteilung zwischen Aluminium (blau) und Stahlstruktur (grau).**

Bildquelle: BMW, nach J.Weiss, HTWG Konstanz.

### Purpose Design vs. Plattformstrategie

- Adressierte Impulsgeber:
- Reduzierung des Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge

Die Entwicklung neuartiger Fahrzeugstrukturen für alternativ angetriebene Fahrzeuge zielt darauf ab, die geänderten Randbedingungen der Antriebsvarianten zu nutzen, um beispielsweise Kosten zu reduzieren, die Sicherheit zu gewährleisten, den Nutzwert eines Fahrzeugs zu verbessern oder Verschlechterungen in diesen Bereichen zu kompensieren.

Der durch die Möglichkeiten alternativer Antriebe häufig diskutierte „Paradigmenwechsel“ in der Fahrzeugindustrie eröffnet grundsätzlich neue Möglichkeiten zur Umsetzung völlig neuer Fahrzeugkonzepte.

Die Schwierigkeit hierbei ist, dass die Optimierung einer Fahrzeugstruktur auf eine spezielle Anwendung hin gleichzeitig bedeutet, dass andere Antriebsderivate dadurch schlechter umsetzbar werden. Beispiel aus der heutigen Praxis sind die auf Seite 86 (Abbildung 4.2) gezeigten Unterschiede in den Fahrzeugstrukturen bei heutigen front- und heckmotorbetriebenen Fahrzeugen. Diese Fahrzeugstrukturen sind, was die Anordnung des Antriebs betrifft, nicht miteinander kompatibel. Das Purpose-Design eröffnet zwar Optimierungspotential hinsichtlich Leichtbau, Package und Sicherheit, demgegenüber stehen aber die im heutigen Fahrzeugbau etablierten Plattformkonzepte, welche durch Mehrfachnutzung von großen Anteilen der Fahrzeugstruktur zu hocheffektiver und kostengünstiger Fertigung der Fahrzeuge beitragen (Automobilindustrie 2011). Die Nutzung dieser Plattformen für den Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge (dem sogenannten „Conversion Design“) führt zu Nachteilen bei Package, Fahrzeugmasse und Sicherheit.

Es bedarf der Entwicklung eines „Advanced Conversion Design“, welches die sichere und gewichtsoptimale Einbindung unterschiedlicher Antriebsvarianten mit einer großserientauglichen Plattformstrategie ermöglicht, um den gegenläufigen Eigenschaften von „Conversion Design“ und „Purpose Design“ bestmöglich zu begegnen. Lösungsmöglichkeiten können beispielsweise in den adaptierbaren Fahrzeugstrukturen liegen.

### Integration von Antriebs- und Speichertechnologien

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung des Fahrzeugmasse
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- NVH-Anforderungen

Eine intelligente Integration von Funktionen in Tragstrukturen kann zu einer Reduzierung des Bauraumbedarfs von Komponenten führen und den Nutzwert erhöhen. Des Weiteren lassen sich möglicherweise durch Doppelnutzung von Strukturen Kosten reduzieren. In heutigen Fahrzeugen beschränkt sich die Nutzung von Integrationspotentialen in der Zusammenfassung von mehreren Einzelteilen in beispielsweise hochintegrierten Gussbauteilen. Alternative Antriebsarchitekturen bieten möglicherweise größere Spielräume für eine intensivere Nutzung von Integrationspotentialen, wie in folgenden Beispielen erläutert:

Aktuelle Verbrennungsmotoren lassen sich aus Gründen der Schall- und Schwingungsübertragung nur in Sonderanwendungen des Rennsports in die Fahrzeugstruktur einbinden. Elektrische Maschinen bieten aufgrund der geänderten Anregungsspektren verbesserte Möglichkeiten, die Struktureigenschaften des Antriebs mit der Fahrzeugstruktur zu verbinden. Diese kann genutzt werden, um beispielsweise Karosserie- oder Fahrwerksstrukturen leichter zu bauen.

Batteriegehäuse stellen bei heutigen technischen Ausführungen auf Grund der benötigten Sicherheitsfunktion und dem integrierten Kühlsystem zwischen 24 und 38% der Batteriesystemmasse dar (Wallentowitz et al. 2006). Die synergetische Nutzung dieser Gehäuse als Teil der Karosseriestruktur kann zur Gewichts- und Kostenreduktion genutzt werden.

Wasserstoffhydridspeicher nutzen in gegenwärtigen Ausführungen häufig Gehäuse aus Aluminiumprofilen. Die Einbindung derartiger Speicher in die Tragstruktur kann, vergleichbar den Batteriegehäusen, zur Masse- und Kostenreduktion genutzt werden.

Es bedarf allerdings zur Bereitstellung funktionierender Systeme erheblicher Forschungsanstrengungen, damit die beschriebenen Potentiale ausgeschöpft werden können.

### **Designvariable Sandwichstrukturen**

Adressierte Impulsgeber:

- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- Ressourcenverfügbarkeit
- Fahrzeugklimatisierung

Sandwichstrukturen werden seit längerer Zeit in Leichtbaukonstruktionen eingesetzt. Im Fahrzeugbau beschränken sich derzeitige Anwendungen im Wesentlichen auf Nutzfahrzeugstrukturen, bei denen diese Materialien in Form ebener Platten eingesetzt werden.

Stark konturierte Strukturen, wie sie in modernen Karosserien vorzufinden sind, eignen sich kaum für die Nutzung von Sandwichbauweisen.

Sandwichstrukturen besitzen grundsätzlich ein hohes Potential, um in Form von sehr leichten und stabilen Strukturen, durch verbesserte Isolation der Fahrzeugstruktur und durch günstige Dämpfungseigenschaften zur Effizienz- und Komfortsteigerung von alternativ betriebenen Fahrzeugen beizutragen.

Hierfür bedarf es allerdings einer deutlichen Weiterentwicklung heutiger Sandwichbauweisen. Es werden Technologien zur Herstellung dreidimensional konturierter Bauteile benötigt, welche neben den heute schon besser geeigneten Faserverbundwerkstoffen auch metallische Bauweisen ermöglichen. Die Entwicklung neuartiger, einfacher verarbeitbarer Kernwerkstoffe, z. B. auf Aerogelbasis, können das Leichtbau- und Isolationspotential weiter verbessern.

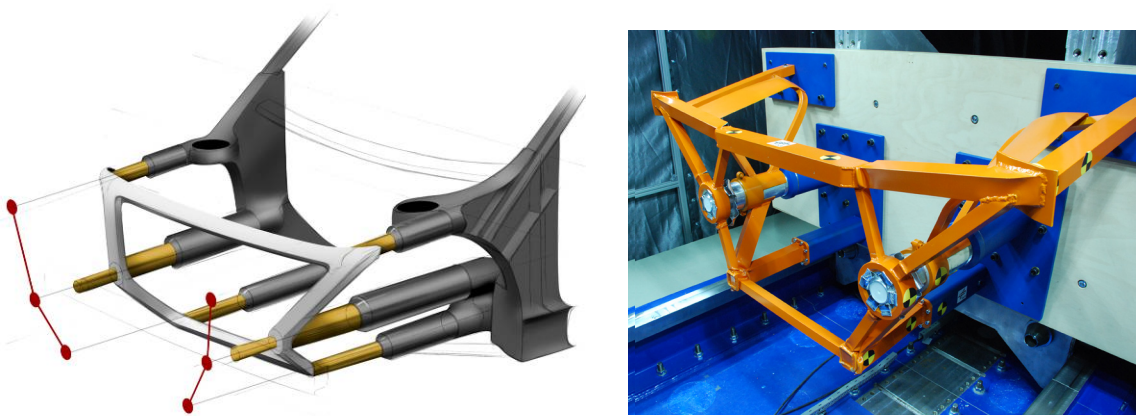
### **Adaptierbare Fahrzeugstrukturen**

Adressierte Impulsgeber:

- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge



Um eine einfache sicherheitstechnische Abstimmung des Crashverhaltens eines Fahrzeugs zu erreichen, ohne dabei die wirtschaftlichen Vorteile von Plattformstrategien zu verlieren, wäre die Verfügbarkeit von einfach crashadaptierbaren Fahrzeugstrukturen von Vorteil. Fahrzeugstrukturen, deren Eigenschaften in einer gewissen Bandbreite beeinflusst werden können, ohne dabei beispielsweise in die Grundgeometrie oder das Package eingreifen zu müssen, zählen zu diesen technologischen Lösungsansätzen. Beispiel für eine solche Struktur ist die von (Beeh et al.2010) vorgeschlagene adaptierbare Vorderwagenstruktur. In diesem Bauweisenkonzept wird Crashenergieabsorption und Steifigkeit der Struktur teilweise getrennt, so dass das Potential zur Energieabsorption ohne weitreichende Eingriffe in die Grundstruktur geändert werden kann. Dadurch können in der gleichen Fahrzeugstruktur unterschiedliche Antriebsvarianten sicherheitstechnisch optimal angepasst verbaut werden (Abbildung 4.15).



**Abbildung 4.15: Konzeptidee (links) und erfolgreich im Crash erprobte (rechts) adaptierbare Vorderwagenstruktur.**

Bildquellen: DLR.

Ein weiteres Beispiel einer adaptierbaren Fahrzeugstruktur findet sich im Einsatz hybrider Träger wieder. Diese werden bei gleichbleibender Außengeometrie mit unterschiedlichen Kernmaterialien gefüllt, so dass sich die Crashkennung unkompliziert an die jeweilige Fahrzeuganforderung anpassen lässt.

Derartige adaptierbare Fahrzeugstrukturen befinden sich im Moment noch im Forschungsstatus. Für eine Nutzung entsprechender Technologien in Serienfahrzeugen besteht weiterer erheblicher Forschungsbedarf, z. B. in der Entwicklung von Simulationsmethoden, im Bereich der Standfestigkeit und im Bereich der Fertigungs- und Produktionstechnik.

### **Multidisziplinäre Optimierung (MDO)/Entwicklungsmethoden**

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung des Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- Fahrzeugklimatisierung
- NVH-Anforderungen

Die an vielen Stellen des Kapitels 4.2 zu erkennende wachsende Komplexität von Anforderungen und Lösungsvarianten erfordert nicht nur die Vernetzung von Kompetenzen, sondern auch die Unterstützung von Entwicklungsteams durch verbesserte Entwicklungswerkzeuge. Die multidisziplinäre numerische Optimierung von Bauteilen, Baugruppen und Gesamtfahrzeugstrukturen ist ein wichtiger Bestandteil, um zunehmende Komplexität der Anforderungen, wie z. B. Topologie, Festigkeit, Steifigkeit, Crashverhalten, Schwingungsverhalten, Lebensdauer und Fertigungsrestriktionen in einem globalen Optimierungsansatz zu begegnen. Wichtig bei komplexen Software-Werkzeugen, ist die Benutzerführung und Bedienfreundlichkeit. Bei Anwendung der multidisziplinären Optimierung besteht ein hohes Risiko, durch Fehlgewichtungen und falsche Eingaben zu völlig verzerrten Ergebnissen zu kommen. In den Unternehmen bedarf es möglicherweise fachübergreifender Expertenrunden, um Eingabeparameter fachlich korrekt abzustimmen. Hier besteht hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die technologischen Möglichkeiten der Rechnerunterstützung optimal zu nutzen.

### 4.2.3 Fertigungstechnologien

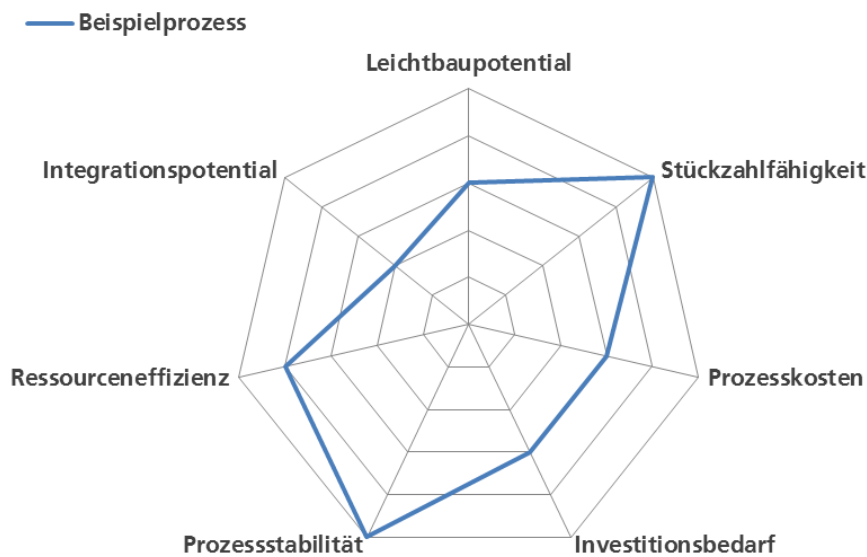
Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung des Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Ressourcenverfügbarkeit

Die Fertigungstechnologien stellen die Brücke zwischen Werkstoff- und Bauweisenentwicklung und der serientechnischen Umsetzung dar. Da Fertigungsprozesse das breite Feld von der Halbzeugherstellung, der Bauteilherstellung, der Bearbeitung, der Verbindung und Montage und dem Oberflächenschutz umfassen, können nur auszugsweise relevante Weiterentwicklungen der Fertigungstechnologien Erwähnung finden. In Abbildung 4.16 sind aus Kapitel 4.1, 4.2.1 und 4.2.2 abgeleitete Bewertungskriterien und ein Beispiel einer Prozessbewertung dargestellt.

Die gewählten Kriterien sind wie folgt zu verstehen:

<b>Leichtbaupotential:</b>	Potentiale des Fertigungsleichtbaus
<b>Stückzahlfähigkeit:</b>	Mögliche Taktzeiten
<b>Prozesskosten:</b>	Niedrigere Prozesskosten werden auf der Skala besser bewertet
<b>Investitionsbedarf:</b>	Anlagen- und Werkzeugkosten; Niedrigerer Investitionsbedarf wird besser bewertet
<b>Prozessstabilität:</b>	Ausschussrisiken und Fehlerraten
<b>Ressourceneffizienz:</b>	Effizienz der Prozessenergie- und Werkstoffnutzung
<b>Integrationspotential:</b>	Möglichkeiten zur Funktionsintegration und zum Tailoring



**Abbildung 4.16: Bewertungskriterien für Fertigungsprozesse mit Darstellung eines neutralen Beispiels (blau).**

Erst durch geeignete Fertigungsprozesse mit präziser Prozessführung gelingt es, Werkstoffeigenschaften optimal zu nutzen. Für Leichtbaulösungen spielen höchstfeste Stähle, hochfeste Aluminium- und Magnesiumlegierungen eine wichtige Rolle. Diese Werkstoffe lassen sich nur im warmen oder heißen Zustand gut umformen, was die Taktzeiten verlängert bzw. den Umformprozess und die gefertigten Bauteile verteuert.

Für die Verarbeitung höchstfester Stähle im Presshärteverfahren werden glühend heiße Platinen im Werkzeug umgeformt und gleichzeitig durch den schnellen Abkühlprozess verfestigt. Weiterentwicklungen ergänzen diesen Prozess durch im Werkzeug lokal unterschiedliche Abkühlkurven, so dass im selben Bauteil Bereiche mit unterschiedlicher Duktilität und Festigkeit realisiert werden können. Ähnliche Prozessführungen sind mit anderen metallischen Werkstoffen gleichermaßen denkbar. Wichtig bei der Weiterentwicklung von hochproduktiven Umformprozessen ist die Energieeffizienz der Fertigungsprozesse.

Neben den Fertigungsverfahren für metallische Bauteile werden produktive Verfahren für die Herstellung von Faserverbunden benötigt. Die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten des Faseraufbaus bei Hochleistungsfaserverbunden, welche von Anwendung zu Anwendung variieren können, erschweren bislang die Entwicklung hochautomatisierter Fertigungsverfahren. Im Wesentlichen können die folgenden fertigungs- und verfahrenstechnischen Herausforderungen für Hochleistungsfaserverbunde identifiziert werden:

- Herstellung der Rohfasern
- Herstellung von Faserhalbzeugen, wie Gelegen oder Geweben
- Präziser Zuschnitt von Fasermatten
- Positionierung und Fixierung in Werkzeugen
- Schnelle Infiltration und Aushärtung
- Beschnitt der Bauteile

Neben den Fertigungsverfahren für Hochleistungsfaserverbunde gibt es bei den auf thermoplastischen Matrixsystemen basierenden Organoblech- und (Tailored-) LFT-Verfahren weiterhin Bedarf, die Herstellverfahren im Hinblick auf Prozesssicherheit, Bauteilqualität, Möglichkeiten zur Funktionsintegration und Verkürzung von Taktzeiten weiterzuentwickeln.

Die beschriebenen werkstofftechnischen und bauweise-technischen Innovationen finden nur dann ihren Weg in den Serieneinsatz, wenn für die Fahrzeugmontage serienfähige Verbindungstechniken zur Verfügung stehen. Der insbesondere durch den wachsenden Leichtbaubedarf zu erwartende verstärkte Materialmix in Fahrzeugen erfordert die Weiterentwicklung von Verbindungstechnologien für das Multi-Material Design. Anforderungen für diese Fügetechnologien sind niedrige Kosten, möglichst kurze Taktzeiten und die Gewährleistung des Korrosionsschutzes.

#### 4.2.4 Kompetenzen und Qualifikation

Adressierte Impulsgeber:

- Reduzierung der Fahrzeugmasse
- Kostenattraktivität und Stückzahlfähigkeit
- Sicherheit elektrifizierter Fahrzeuge
- Ressourcenverfügbarkeit
- Fahrzeugklimatisierung
- NVH-Anforderungen

In Industrie und Forschung werden spezielle Kompetenzen und Qualifikationen benötigt, um den in Kapitel 4.1 beschriebenen Impulsgebern zu folgen und Handlungsoptionen auf dem Gebiet der innovativen Fahrzeugstrukturen im Sinne einer nachhaltigen Technologieführerschaft zu nutzen. Die unter anderem im Rahmen der durchgeführten Expertenworkshops identifizierten Handlungsfelder werden im Folgenden beschrieben.

Ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg ist die effektive Vernetzung bereits vorhandener Kompetenzfelder. Einige der an den Expertenworkshops beteiligten Teilnehmer aus der Zulieferindustrie wünschen sich ausdrücklich eine partnerschaftlichere und offenere Zusammenarbeit zwischen Automobilfirmen und Lieferanten. Die fehlende Einbindung in längerfristige technologische Weichenstellungen macht es den Zulieferern schwer, die Bedarfe der Industrie realistisch einzuschätzen und sich auf zukünftige Technologien vorzubereiten. Die Kompetenzverknüpfung zwischen Zulieferern untereinander und mit Forschungseinrichtungen und Universitäten ist ebenfalls stark ausbaufähig. Kleinen und mittelgroßen Unternehmen fehlen häufig personelle Anknüpfungspunkte und Ressourcen. Der Aufbau von Kompetenznetzwerken, Clustern und den TecNets schafft Kontaktpunkte und eröffnet Chancen, um Stärken einzelner Organisationen synergetisch zu verbinden. Wichtig ist die Beobachtung und die gegebenenfalls notwendige Modifikation der Maßnahmen in Bezug auf ihre Wirksamkeit.

Ein wesentliches Hemmnis für die nachhaltige Zusammenführung unterschiedlicher Kompetenzen ist die verständliche Furcht vor Know-How-Verlust an Wettbewerber. Günstig wäre es, wenn für Innovationspartnerschaften attraktive Fördervoraussetzungen oder Joint-Venture-Geschäftsmodelle geschaffen würden, um partnerschaftliche Aktivitäten zu erleichtern. Bei heutigen Entwicklungsprojekten werden häufig

etliche Monate benötigt, um sich auf beiderseitig akzeptierbare Rahmenvertragsbedingungen zu einigen. Verbindliche Rechtsgrundlagen, welche die Rahmenbedingungen für Innovationspartnerschaften vorgeben würden, könnten eine Möglichkeit zur besseren Vernetzung der Kompetenzen darstellen.

In der Fahrzeugindustrie herrscht großflächige Einigkeit darüber, dass ein wichtiger Schlüssel zur Lösung von Gewichts-, Sicherheits-, Isolations-, und NVH-Fragen der intelligente Materialmix ist. Das sogenannte Multi-Material-Design (MMD) verknüpft vorteilhafte Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe zu einem optimierten, aber komplexeren Gesamtsystem. Die in Kapitel 4.2 adressierten Handlungsoptionen, wie z. B. die Nutzung verschiedener Werkstoffe in neuartigen Bauweisen mit Hilfe geeigneter Füge- und Korrosionsschutzverfahren, werden im MMD in geeigneter Weise kombiniert. Es ist wichtig, die Kompetenzen in den Gebieten Leichtbauwerkstoffe, Leichtbaukonstruktion, Faserverbundbauweisen und -fertigung, Hybridbauweisen und der Verbindungstechnik auszubauen und besser zu nutzen, um die Fähigkeiten der Fahrzeug- und Zulieferindustrie auf diesem wichtigen Gebiet zu stärken.

Die Weiterbildung und Qualifikation von bereits in der Industrie arbeitenden Fachkräften in den genannten Gebieten ist ein wichtiger Baustein, um wettbewerbsfähig zu bleiben und neue Werkstoff- und Bauweisenkonzepte zu einer erfolgreichen Anwendung zu bringen. Mit der Markteinführung neuer Technologien in der Fahrzeugstruktur wird die Weiterbildung von Werkstattpersonal und der Rettungskräfte erforderlich.

Neben der zunehmenden werkstoff- und bauweisenbedingten Komplexitätszunahme erfordert die gleichzeitige Auslegung von Bauteilen auf unterschiedliche physikalische und fertigungstechnische Anforderungen, weiterentwickelte Entwicklungsmethoden. Die gleichzeitige Optimierung mehrerer Einflussparameter, wie z. B. der mechanischen, der thermischen und der akustischen Eigenschaften zu einem multi-optimalen Bauteil erfordert Kompetenzen und Werkzeuge zur multidisziplinären Optimierung. Auch hier gilt es, Kompetenzen zusammenzuführen. Wichtig ist gleichermaßen die Sensibilisierung und Schulung von Mitarbeitern, um die Möglichkeiten solcher Systeme effektiv zu nutzen.

## 5 Analyse zukünftiger Heiz- und Kühlstrategien

Elektrifizierte Fahrzeugkonzepte bedürfen spezieller Konzepte zum Heizen und Kühlen von Fahrzeugkomponenten und Fahrgastraum. Heizen und Kühlen kann unter dem Begriff des Temperierens bzw. des Thermomanagements zusammengefasst werden. Ziel ist es, die Temperatur von Fahrzeugkomponenten innerhalb gewisser Temperaturgrenzen zu halten, um eine Bauteilbeschädigung bzw. eine vorzeitige Alterung zu vermeiden. Für den Fahrgastraum sind neben der Komforttemperatur zusätzlich eine ausreichende Frischluftzufuhr und beschlagsfreie Fensterscheiben erforderlich. Entsprechende Vorschriften und Normen sind:

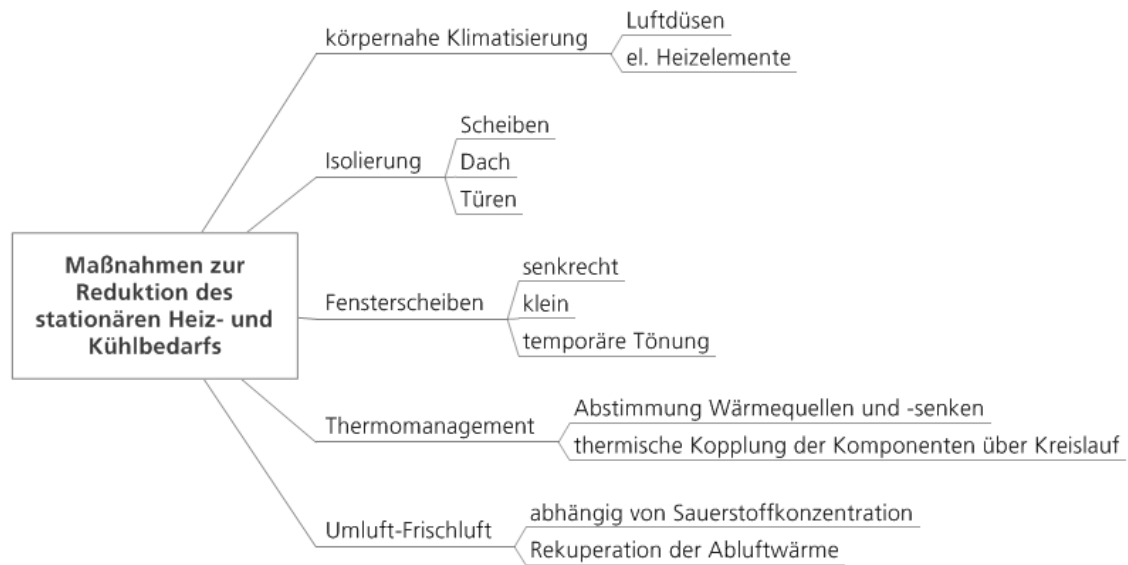
- DIN 1946-3, Ausgabe:1962-06  
Lüftungstechnische Anlagen; Lüftung von Fahrzeugen
- DIN EN 13799  
thermischen Behaglichkeit
- BGV D29  
Unfallverhütungsvorschrift, Fahrzeuge
- Richtlinie 78/317/EWG  
zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Entfrostsungs- und Trocknungsanlagen für die verglasten Flächen von Kraftfahrzeugen
- FMVSS 103 - Windshield defrosting and defogging systems
- SAE J902 Passenger Car Windshield Defrosting Systems

Bei verbrauchsoptimierten, verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen und Hybridfahrzeugen reicht die Motorabwärme bereits heute nicht mehr zum Heizen des Fahrgastraumes aus, so dass Zusatzheizungen eingesetzt werden müssen (Wallentowitz et al. 2009). Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist das Abwärmeangebot von Elektroantriebsmotor und Batterie so gering, dass diese nur einen kleinen Beitrag zur Beheizung des Fahrgastraumes leisten können. Aus diesem Grund sind zusätzliche Energiewandler bzw. Energiespeicher mitzuführen. Zwei wesentliche Aspekte beim Vergleich verschiedener Konzepte sind hierbei die durch die Batteriekapazität begrenzte Reichweite und die möglichst zu erhaltende lokale Emissionsfreiheit. Aufgrund der temperatursensiblen Leistungsabgabe und Alterung ist dabei das Thermomanagement der Traktionsbatterie ein wichtiger Aspekt.

### 5.1 Maßnahmen zur Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs

In einem ersten Schritt sollen verschiedene Maßnahmen dargestellt werden, über die der Leistungsbedarf zur Wärmezufuhr und Abfuhr reduziert werden kann.

Der Leistungsbedarf wird in den stationären und den dynamischen Betrieb unterschieden. Nach Fahrzeugstart muss im Winter das ausgekühlte Fahrzeug zunächst auf die gewünschte Komforttemperatur aufgeheizt werden. Je höher die Heizleistung, desto schneller erreichen die Kabinenluft und thermischen Massen (Armaturen, Polster etc.) die Komforttemperatur. Diese erste Phase wird als dynamisch bezeichnet. Nach Erreichen der Komforttemperatur ist aufgrund der Wärmeverluste an die Umgebung eine reduzierte Heizleistung erforderlich. Diese Phase wird als stationär oder auch Erhaltungskühlen bzw. -heizen bezeichnet.



**Abbildung 5.1: Maßnahmen zur Reduktion des stationären Heiz- und Kühlbedarfs.**

Quelle: DLR.

Abhängig vom Fahrzeugkonzept beträgt der stationäre Kühlbedarf im Sommer etwa 3 kW und der Heizbedarf im Winter etwa 6 kW (Sondermann 2008).

Der dynamische Heiz- bzw. Kühlleistungsbedarf ist jedoch größer, da nach Fahrtbeginn im Winter zuerst das kalte Fahrzeug aufgewärmt bzw. im Sommer das aufgeheizte Fahrzeug abgekühlt werden muss. Um nach der Fahrt also schnellstmöglich die Komforttemperatur zu erreichen, gilt es, die thermischen Massen im Fahrgastraum zu reduzieren und die Heiz- und Kühlleistung entsprechend groß zu dimensionieren. Eine für Elektrofahrzeuge sinnvolle Strategie liegt darin, bereits vor Fahrtantritt das Fahrzeug auf Wunschtemperatur zu temperieren (Vorkonditionierung) (Renner et al. 2004). Dies hat den Vorteil, dass die Komponenten auf die kleinere Erhaltungsleistung dimensioniert werden können. Zudem wird die dynamische Aufheiz- bzw. Abkühlenergie nicht der Batterie, sondern dem elektrischen Netz entnommen, so dass die elektrische Reichweite nicht verringert wird.

Die Maßnahmen zur Reduktion des stationären Heiz- und Kühlbedarfs werden im Folgenden genannt.



**Tabelle 5.1: Kühlbedarf eines Pkw. Testbedingungen: Außentemperatur 40 °C, relative Luftfeuchtigkeit 60%, Sonneneinstrahlung 1000 W/m<sup>2</sup>, 4 Passagiere, 20% Außenluft.**

	Kühlaufwand
Austausch Rahmen und Dach	280 W
Austausch Fenster	80 W
übertragene Sonneneinstrahlung	1100 W
Körperwärme	240 W
Luftabkühlung	250 W
Luftabkühlung und Feuchtigkeitsregelung der Passagiere	1070 W
<b>Gesamtkühlaufwand</b>	<b>3020 W</b>

Quelle: Sondermann (2008).

Aus Messungen von Valeo (Sondermann 2008) ist ersichtlich, dass im Sommer die Sonneneinstrahlung etwa ein Drittel der Kühlleistung verursacht. Zur Reduktion des sonnenbedingten Wärmeeintrags sind verschiedene Maßnahmen denkbar:

- Möglichst kleine, senkrechte Fenster (allerdings aerodynamisch ungünstig)
- Temporäre Scheibentönung beim Parken
- Verwendung entsprechender Lacke, die weniger Sonnenstrahlung absorbieren (Großmann 2010)

Ein weiteres Drittel des Kühlbedarfs wird zur Luftabkühlung und Feuchtigkeitsregelung der Passagiere benötigt. Durch eine Senkung des Frischluftanteils kann dieser Kühlbedarf zwar reduziert werden, doch ist auf einen ausreichenden Sauerstoffgehalt zu achten.

Durch eine körpernahe Klimatisierung wird vermieden, dass die gesamte, im Fahrgastraum befindliche Luft abgekühlt werden muss. Fahrgastnahe Luftauslassdüsen erzeugen lokal um den Fahrgast eine angenehm, kühle Lufttemperatur. Die fahrgastnahen Luftauslässe können nicht nur in den Sitz, sondern auch in den Sicherheitsgurt integriert werden. An den nicht besetzten Sitzplätzen erfolgt keine Kühlung, so dass dadurch der Kühlbedarf signifikant gesenkt wird (Klassen et al. 2011).

**Tabelle 5.2: Heizbedarf eines Pkw. Testbedingungen: Außentemperatur -20 °C, relative Luftfeuchtigkeit 80%, Sonneneinstrahlung 0 W/m<sup>2</sup>, 1 Passagier, 100% Außenluft.**

	Heizbedarf
Austausch Rahmen & Dach	1390 W
Austausch Fenster	870 W
übertragene Sonneneinstrahlung	0 W
Körperwärme	-60 W
Luftaufheizung	3950 W
Luftaufheizung & Feuchtigkeitsregelung	0 W
<b>Gesamtheizbedarf</b>	<b>6150 W</b>

Quelle: Sondermann (2008).

Die Luftaufheizung verursacht fast zwei Drittel des gesamten Heizbedarfs. Dies ist auch auf den hohen Außenluftanteil zurückzuführen, der für einen Passagier weit unter 100% betragen darf. Der Außenluft- bzw. Frischluftanteil könnte also gesenkt werden. Die oben genannten Maßnahmen zur körpernahen Klimatisierung mittels fahrgastnaher Luftauslässe können auch zur Beheizung eingesetzt werden. Der Fahrgast kann zusätzlich über Heizelemente in Sitz und Lenkrad gewärmt werden.

Ein weiterer großer Teil der Wärme geht im Winter über Rahmen und Dach verloren. Zusätzliche Isolierschichten oder der Einsatz isolierender Werkstoffe können diese Verluste minimieren. Der Wärmedurchgangskoeffizient der isolierten Dachfläche liegt unter dem der Fenster. Eine Verkleinerung der Fensterflächen verhindert folglich die Wärmeverluste an die Umgebung. Aufgrund des niedrigen Sonnenstandes im Winter werden selbst bei senkrecht stehenden Fenstern wärmende Sonnenstrahlen in den Fahrgastraum gelangen. Aus aerodynamischer Sicht sind senkrechte Flächen allerdings ungünstig.

Im Workshop 4 wurde die „Minimierung der Energieverluste im Fahrgastraum“ der Forschungsbedarf mit der höchsten Priorität identifiziert (8 Nennungen).

Durch ein fahrzeugübergreifendes Thermomanagement können Wärmequellen und –senken sich gegenseitig ausgleichen, so dass die zusätzlich zu erzeugende Heiz- bzw. Kühlleistung minimiert wird. Zur thermischen Kopplung der Wärmequellen und –senken müssen diese über einen Flüssigkeitskreislauf miteinander verbunden und die Fluidströme geregelt werden.

## 5.2 Heiz- und Kühl-Konzepte für einzelne Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Abhängig vom Fahrzeugkonzept sind unterschiedliche Wärmequellen und –senken mit unterschiedlichen Temperaturniveaus vorhanden und zu versorgen. Allen Antriebskonzepten, egal ob BEV, ICV etc., gemeinsam ist der Fahrgastraum. Im Folgenden soll detailliert auf die unterschiedlichen Antriebsstrangvarianten und die damit verbundenen Implikationen für Heiz- bzw. Kühlkonzepte eingegangen werden.

### 5.2.1 Verbrennungsmotor und Micro- bzw. Mild-Hybrid

Hauptkomponenten des Thermomanagements von ICV, Micro- und Mild-Hybriden sind die Motorkühlung und der Fahrgastraum. Wie eingangs erwähnt müssen aufgrund der gesteigerten Effizienz der Verbrennungsmotoren (speziell Dieselmotoren) bereits heute Zusatzheizungen zur Sicherstellung der Fahrgastraumbeheizung eingesetzt werden. Meist kommen hierbei Brennstoffzuheizer oder elektrische Heizelemente zum Einsatz, die entweder das Kühlwasser oder direkt die in den Fahrgastraum eingeleitete Luft aufheizen. Brennstoffzuheizer haben den Vorteil, dass sie auch als Standheizung eingesetzt werden können, so dass der Fahrer bereits in ein vorgewärmtes Auto einsteigen kann.

Bei den elektrischen Heizelementen handelt es sich meist um PTC-Widerstände (positive temperature coefficient). Diese sind zuverlässig, eigensicher gegenüber Überhitzung, kompakt und preisgünstig. Sie können entweder in das zentrale Heiz-Klima-Gerät (wasser- oder luftseitig) oder fahrgastnah z. B. in den Sitz oder das Lenkrad eingebaut werden (Beetz et al. 2010).

In Serienfahrzeugen wird die Abgaswärme bisher selten genutzt. Zur Verkürzung der Kaltstartphase kann über einen Abgaswärmeübertrager Wärme vom Abgas ins Kühlwasser geleitet werden. Auch Abgaswärmenutzungskonzepte wie der thermoelektrische Generator erfüllen diese Funktion. Von einigen wenigen Forschungseinrichtungen werden hierfür thermoelektrische Materialien und thermoelektrische Generatoren entwickelt und in Fahrzeuge integriert. Weiterhin kann die Kühlwasserwärme in einem Wärmespeicher zwischengespeichert und zeitversetzt wieder abgegeben werden. BMW hat darüber hinaus bereits einen Latentwärmespeicher in den Kühlwasserkreislauf integriert welcher die Wärme aus dem Kühlwasser speichert. Nach einer längeren Stillstandphase (z. B. über Nacht) kann diese Wärme dann wieder dem Kühlwasser zugeführt werden, wodurch sich die Kaltstartphase verkürzt. Aufgrund von Dichtigkeitsproblemen kam es jedoch zu Korrosionsschäden, weswegen die entsprechenden Fahrzeuge wieder zurückgerüstet wurden. Hergestellt wurde der Latentwärmespeicher von Modine.

Die Motorkühlung erfolgt über einen Wasser-Glykol-Kühlmittelkreislauf. Diese Wärme wird über den Frontkühler an die Umgebungsluft abgegeben, aber auch teilweise über einen speziellen Wärmeübertrager für die Beheizung des Fahrgastraums verwendet.

Bereits bei Mild-Hybriden hat die Batterie eine so hohe Leistung und Verlustwärme, dass sie gekühlt werden muss. Hierzu sind verschiedene Einbindungen in das Thermomanagement des Fahrzeugs denkbar (Heckenberger 2009).

Die Kühlung des Fahrgastraums erfolgt über eine Kompressionskältemaschine – auch einfach Kältemittelkreislauf oder Kältekreislauf genannt. Mit Hilfe verbesserter Komponenten lässt sich der Wirkungsgrad steigern und die Geräuschentwicklung reduzieren.

Durch die Start-Stopp-Automatik wird der Verbrennungsmotor häufiger abgeschaltet, wodurch der riemengetriebene Klimakompressor stillsteht und die Temperatur des Fahrgastraums ansteigt. Speicherdampfer können diese, bis zu einer Minute dauernden Pausen überbrücken, indem sie während des Motorbetriebs Kälteleistung speichern und während des Stillstands abgeben.

### 5.2.2 Vollhybrid

Vollhybride haben gegenüber dem Micro- und Mild-Hybrid einen leistungsstärkeren Elektromotor sowie eine (größere) Traktionsbatterie. Die Temperatur der Traktionsbatterie darf im Falle des NiMH- und Lilonen-Akkumulators maximal 40 °C betragen und muss deshalb entsprechend gekühlt werden. Zu niedrige Temperaturen führen zu einem Abfall der entnehmbaren Leistung, weshalb die Traktionsbatterie gegebenenfalls beheizt werden muss. Zur Temperierung des Akkumulators sind verschiedene Konzepte möglich (Heckenberger 2009).

Die Abwärme des Verbrennungsmotors reicht zur Beheizung nicht aus, da dieser gegenüber dem ICV kleiner ist und häufiger stillsteht. Wie beim ICV können sowohl Brennstoffzuheizer als auch elektrische Heizelemente zum Einsatz kommen, die entweder das Kühlwasser oder direkt die in den Fahrgastraum geblasene Luft aufheizen. Aufgrund der höheren erforderlichen Zusatzheizleistung kommen als elektrische Heizelemente Hochvolt-PTC-Elemente zum Einsatz. Durch die höhere Spannung halten sich die elektrischen Verluste in den Zuleitungen in Grenzen.

Die Implementierung der Zusatzheizung in den Motorkühlkreislauf hat den Vorteil, dass die Kaltstartphase verkürzt wird und der Verbrennungsmotor dadurch effizienter und emissionsärmer läuft (Beetz et al. 2010). Bei der direkten Beheizung der Fahrgastraumlufte stellt sich hingegen die Komforttemperatur schneller ein.

Damit die Fahrgastraumkühlung auch bei stehendem Verbrennungsmotor gewährleistet werden kann, darf kein rein riemengetriebener Klimakompressor eingesetzt werden. Möglich sind rein elektrische Klimakompressoren oder Hybrid-Klimakompressoren, die sowohl über einen Riemen vom Verbrennungsmotor als auch über den integrierten Elektromotor angetrieben werden können.

### 5.2.3 Batteriefahrzeug

BEVs besitzen als mögliche Wärmequellen nur noch Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor. Um die Abwärme jedoch für den Fahrgastraum nutzen zu können, müssen diese Komponenten über einen Kühlmittel- oder Wasser-Kreislauf miteinander verbunden sein, was wiederum mit zusätzlichem Aufwand und zusätzlichen Kosten verbunden ist. Unabhängig davon ist der Großteil der Wärmeleistung von einem Heizsystem zu liefern. Hierzu sind unterschiedliche Systeme denkbar.

Brennstoffzuheizer entnehmen ihre Energie nicht der Traktionsbatterie und beeinflussen die Reichweite somit nicht negativ. Durch den Einsatz fossiler Brennstoffe für den Zuheizer geht allerdings die lokale Emissionsfreiheit verloren, welche jedoch der größte Vorteil von BEV ist.

Hochspannungs-PTC-Elemente wandeln die zugeführte elektrische Leistung vollständig in Wärme um. Sie sind sehr leistungsfähig und benötigen nur einen geringen Bauraum. Allerdings wird die elektrische Energie der Traktionsbatterie entnommen, so dass die Reichweite je nach Fahrdauer erheblich gesenkt wird.

Eine Wärmepumpe arbeitet energetisch günstiger als PTC-Elemente und reduziert die Reichweite nicht im gleichen Maße. Allerdings ist das System komplexer (zusätzliche Komponenten, Enteisung, Beschlagbildung etc.).

Wärmespeicher (sensibel, latent oder chemisch) können vor Fahrtbeginn über die Ladestation aufgeheizt werden und anschließend während der Fahrt ihre Wärme an den Fahrgastraum abgeben.

Zur Kühlung von Elektrofahrzeugen sind Kompressions-Kältemaschinen geeignet. Der Klimakompressor wird hierbei jedoch elektrisch über einen integrierten Elektromotor angetrieben, so dass der Klimakompressor fertigungsintensiver wird.

Zur Reduktion des thermischen Leistungs- und Energiebedarfs nach Fahrtbeginn ist bei Elektrofahrzeugen eine thermische Vorkonditionierung notwendig. Hierzu ist ein Anschluss ans elektrische Netz erforderlich. Im Gegensatz zu ICV kann das Fahrzeug bei entsprechender Ausstattung nicht nur aufgeheizt, sondern auch abgekühlt werden.

#### 5.2.4 Brennstoffzellenfahrzeug

Im Vergleich zum BEV besitzen FCV kleinere Traktionsbatterien, jedoch zusätzlich eine PEM-Brennstoffzelle mitsamt Wasserstofftank. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich meist um eine wassergekühlte Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM) (vgl. Kapitel 3.6). Als Wasserstofftank werden darüber hinaus meist Drucktanks, aber auch Metallhydridspeicher eingesetzt. Die Abwärme von Brennstoffzelle, Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor reicht nicht aus, um den Fahrgastraum in allen Betriebszuständen zu beheizen. Die im BEV eingesetzten Heiz- und Kühlkonzepte lassen sich auch im FCV verwenden. Allerdings wird zur Kühlung des Brennstoffzellenstacks ein zusätzlicher Kühlkreislauf benötigt. Wird ein Metallhydridspeicher eingesetzt, so benötigt dieser zur Wasserstofffreisetzung Wärme. Diese kann aus der Abwärme der Brennstoffzelle gedeckt werden, wodurch entsprechend weniger Kühlleistung benötigt wird.

### 5.3 Heiz- und Kühl-Konzepte allgemein (für alle Fahrzeug- und Antriebskonzepte)

Im Folgenden soll im Detail auf die zuvor erwähnten Heiz- und Kühlkonzepte bzw. -systeme eingegangen werden.

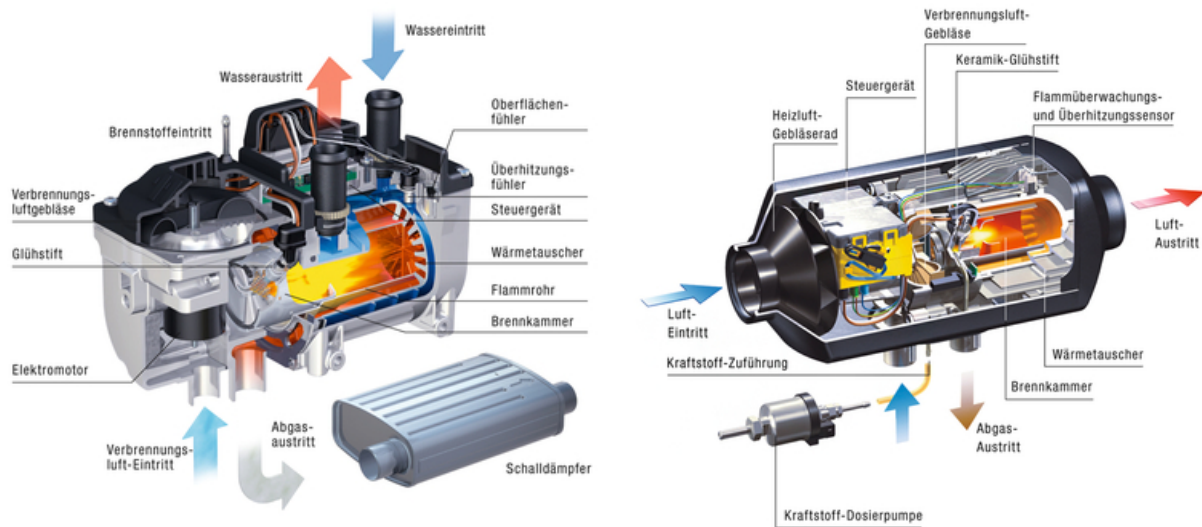
#### 5.3.1 Heizkonzepte: Energiewandler und -speicher

##### 5.3.1.1 Brennstoffzuheizer

Brennstoffzuheizer werden bereits in ICV als Stand- und Zusatzheizer eingesetzt. Die bei der Verbrennung frei werdende Wärme wird entweder über einen Gas/Gas-Wärmeübertrager der Innenraumluft (Luftheizung) oder über einen Gas/Flüssig-Wärmeübertrager dem Wasserkreis zugeführt (Wasserheizung).

Letztere Variante hat den Vorteil, dass die Kaltstartphase verkürzt und der eventuell vorhandene Verbrennungsmotor somit effizienter und emissionsärmer betrieben werden kann. Voraussetzung für die den Einsatz einer Wasserheizung ist allerdings ein Wasserkreislauf, bestehend aus Wasserpumpe, Wärmetauscher und Zuleitungen.

Luftheizungen benötigen weniger Bauteile und im Fahrgastinnenraum wird die Komforttemperatur schneller erreicht (vgl. Abbildung 5.2).



**Abbildung 5.2: Beispiele für Heizkonzepte: Wasserheizung (Eberspächer Hydronic, links) und Luftheizung (Eberspächer Airtronic, rechts).**

Bildquellen: J. Eberspächer GmbH & Co. KG, Hydronic (2011b), Airtronic (2011a).

Beim Einsatz in BEV muss zusätzlich ein Brennstofftank mitgeführt und neben elektrischem Strom ein weiterer Energieträger getankt werden. Aufgrund der geringen elektrischen Leistungsaufnahme von etwa 40 W wird durch den Betrieb der Brennstoffzuheizer die Reichweite von BEV nur minimal reduziert. Der größte Nachteil ist die Tatsache, dass durch die Verbrennung die lokale Emissionsfreiheit nicht mehr gegeben ist. Ein FCV kann Wasserstoff in einen Zuheizer verbrennen, doch entstehen aufgrund der hohen Temperaturen Emissionen in Form von Stickoxiden.

### 5.3.1.2 PTC-Heizelemente

PTC steht als Abkürzung für Positive Temperature Coefficient, sogenannte Kaltleiter. PTC-Heizelemente bestehen aus einer Keramik und weisen bei niedriger Temperatur einen geringeren ohmschen Widerstand auf als bei höheren Temperaturen.

Die elektrische Energie wird im PTC-Element direkt in Wärme umgewandelt und an das umgebende Fluid (meist Luft oder Wasser) über die Oberfläche abgegeben. Diese Wärmeübertragung kann direkt über die Keramik oder aber über auf die Keramik aufgelötete oder aufgeklebte Wellrippen oder Lamellen erfolgen. Die Wärme wird hierbei durch erzwungene Konvektion übertragen. Das vorbeiströmende Fluid kühlt die Keramik, welche wiederum durch die selbstregelnde Charakteristik des PTC-Elements aufgeheizt wird. Es stellt sich so ein gewisser Arbeitsbereich des PTC-Elements ein. Sobald die kühlende Wirkung des vorbeiströmenden Fluids nicht mehr in ausreichendem Maße vorhanden oder die Anschlüsse des Elements verpolt sind, steigt der Widerstand des PTC über der Referenztemperatur an, wodurch sich dessen Widerstand stark erhöht und somit einen geringeren Stromfluss und auch eine geringere Heizleistung zur Folge hat. Das PTC-Element regelt sich also selbst bzw. schützt sich vor Zerstörung durch Überlastung und Verpolung und birgt so einem Ausfall vor.

Für leistungsstärkere PTC-Heizsysteme sind elektrische Spannungen von weit über 12 V erforderlich, um die elektrischen Ströme und Widerstandsverluste in den Zuleitungen klein zu halten. Diese HV-PTC arbeiten mit Spannungen zwischen 200 und 500 V, wie sie von der Energieversorgung heutiger Elektrofahrzeuge bereitgestellt werden, und stellen dabei eine Leistung von bis zu 5.000 W zur Verfügung.

Vorteile der PTC-Heizer sind der kleine Bauraum- und Gewichtsbedarf. Zudem können sie an verschiedenen Stellen im Fahrzeug platziert werden, wie beispielsweise im Wasserkreislauf, Heiz-Klima-Gerät, Autositz, Lenkrad etc. Weitere Vorteile sind die erwähnte Selbstregelung, die schnelle Fahrgastraumerwärmung nach Kaltstart sowie der hohe Wirkungsgrad.

Die zur Beheizung benötigte elektrische Leistung stammt bei BEVs vollständig aus der Traktionsbatterie, so dass die Reichweite erheblich reduziert werden kann. Die Reichweitenreduktion stellt für BEV den größten Nachteil der PTC-Heizer dar. Da PTC-Heizer die elektrische Leistung bereits vollständig in Wärme umwandeln, sind hier keine Verbesserungen mehr möglich.

### 5.3.1.3 Strahlungsheizung

Die Strahlungsheizung lässt sich zur direkten Beheizung der Fahrgäste einsetzen. Zur Beheizung von Fahrzeugkomponenten erscheint sie eher ungeeignet. Im Gegensatz zur Konvektionsheizung wird der Fahrgast nicht indirekt über die ihn umgebende Luft, sondern direkt über die von der Strahlungsheizung emittierte Wärmestrahlung erwärmt. Durch den Einsatz der Strahlungsheizung fühlt der Fahrgast trotz einer niedrigeren Lufttemperatur dieselbe Wärme. Der Heizbedarf kann dadurch insgesamt reduziert werden. Ein quantitativer Zusammenhang von Strahlungsintensität, Lufttemperatur und Wohlbefinden der Passagiere ist allerdings bisher schwer zu ermitteln.

Für den Einsatz im Fahrzeug sind Strahlungsheizungen mit einer Oberflächentemperatur bis 60 °C (Niedertemperatur) und bis 200 °C (Mitteltemperatur) geeignet. Um bei niedriger Oberflächentemperatur ausreichend Wärmeleistung abgeben zu können, muss die Oberfläche entsprechend groß sein. Hierzu ist es sinnvoll, bereits vorhandene Oberflächen, wie z. B. Fahrzeugdach oder -fenster, zu nutzen. Die italienische Firma Isoclima S.p.A. hat hierzu bereits ein Patent angemeldet (Manfre 2006).

Zur Erzeugung der Wärme kommen je nach Temperaturniveau und Strahleroberfläche unterschiedliche Wärmequellen in Frage. Denkbar sind Brenner und Abwärmequellen, die über eine Flüssigkeit die Wärme in den Fahrgastraum transportieren, oder PTC-Heizelemente, die direkt im Fahrgastraum eingesetzt werden können.

### 5.3.1.4 Wärmepumpen

Wärmepumpen lassen sich einteilen in Kompressions-, Absorptions- und Adsorptions-Wärmepumpen, wobei in Fahrzeugen meist die Kompressions-Wärmepumpe zum Einsatz kommt. Diese arbeitet nach demselben Prinzip wie die Kompressions-Kältemaschine und besteht auch aus den gleichen Komponenten (Kompressor, Kondensator, Verdampfer, Expansionsventil und Sammler). Der Unterschied besteht darin, dass bei der Wärmepumpe die kalte Umgebung als Wärmequelle und bei der Kältemaschine die warme Umgebung als Wärmesenke genutzt wird. Der große Vorteil der Wärmepumpe gegenüber den bisher genannten Beheizungssystemen liegt darin, dass die dem Fahrgastraum zugeführte Wärmeleistung die elektrische bzw. mechanische Kompressorleistung übersteigt. Das Verhältnis aus Heizleistung zu erforderlicher Kompressorleistung wird als Leistungszahl, englisch Coefficient Of Performance (COP), bezeichnet. Die Leistungszahl hängt maßgeblich von den beiden Temperaturniveaus, den Wärmeübertragern (Kondensator, Verdampfer) und dem Kältemittel (Arbeitsmedium) ab.



Es ist sinnvoll, die meist ohnehin vorhandene Kompressions-Kältemaschine auch als Wärmepumpe zu betreiben. Da ab 2011 das bisher verwendete Kältemittel R134a für Neuentwicklungen bei Fahrzeugen nicht mehr eingesetzt werden darf, wurden in den vergangenen Jahren als Alternativen R1234yf (Tetrafluorpropan) und R744 (Kohlenstoffdioxid, CO<sub>2</sub>) favorisiert. In den während dieser Zeit entwickelten Wärmepumpen (z. B. von Behr und Denso) wird überwiegend R744 verwendet (Hünemörder 2004; Feuerecker et al. 2005), nur vereinzelt R1234yf (Mardorf et al. 2010). Beim Einsatz von R744 werden deutlich höhere Drücke und damit auch neue, massivere Komponenten erforderlich. Für R1234yf können hingegen die bereits für R134a eingesetzten Komponenten weiterverwendet werden (Mardorf et al. 2010). Der Verband der Automobilindustrie (VDA) widersprach den sicherheitstechnischen Bedenken von Seiten des Umweltbundesamtes (UBA) und entschied sich, wie zuvor schon andere internationale Automobilhersteller und -verbände, für R1234yf. Die für das Kältemittel R134a entwickelten Komponenten müssen für das Kältemittel R1234yf nur leicht modifiziert werden.

Für den Einsatz als Verdichter in Elektrofahrzeugen werden anstelle riemengetriebener Schrägscheibenverdichter elektrisch angetriebene Scrollverdichter eingesetzt. Zur Verringerung der Leckageverluste müssen die Kompressoren entsprechend hermetisch abgedichtet werden (Mardorf et al. 2010).

Vorteile der Wärmepumpe liegen in der Kombinationsmöglichkeit mit der Kompressions-Kältemaschine sowie der Leistungszahl größer eins. Vor allem wenn keine oder nur wenig Abwärme vorhanden ist – wie beim BEV – ist die Wärmepumpe ein sehr gutes Heizsystem. Zur Problematik der Verdampfer-Vereisung (de-icing) und Nebelbildung im Fahrgastraum (Flash-Fogging) gibt es bereits Lösungen verschiedener Hersteller (Hünemörder 2004; Feuerecker et al. 2005). Die Wärmepumpe wird bereits heute eingesetzt, z. B. im Toyota Prius Plug-In (AP 2010b).

### 5.3.1.5 Wärmespeicher

Bei den bisher genannten Heizsystemen handelt es sich ausnahmslos um Energiewandler. Denkbar ist jedoch auch, direkt Wärmespeicher im Fahrzeug mitzuführen und während der Fahrt zu entladen. Wärmespeicher lassen sich einteilen in sensible, latente und chemische Wärmespeicher. Im Zusammenhang mit der Beheizung des Fahrgastraums und evtl. auch der Komponenten von BEV scheinen v. a. Latentwärmespeicher interessant. Diese nutzen zur Wärmespeicherung zusätzlich den Phasenwechsel, weshalb sie auch Phasenwechselmaterialien (engl. phase change material, PCM) genannt werden. Zum „Aufladen“ wird dem festen Material Wärme zugeführt, wodurch die Temperatur ansteigt. Nach Erreichen der Schmelztemperatur beginnt der Phasenwechsel fest-flüssig und die Temperatur steigt erst weiter, wenn die gesamte Masse geschmolzen ist. Die während des Schmelzvorgangs eingebrachte Energie wird als latente Wärme bezeichnet.

In ICV wurden PCM in der Vergangenheit an verschiedenen Stellen eingesetzt. Wärmespeicher zum Einbau in den Kühlmittelkreislauf sind in drei Ausführungsvarianten für den Pkw bekannt geworden. Am bekanntesten sind Latentwärmespeicher, die von den Firmen VW und BMW als Sonderausstattung angeboten wurden sowie Wärmespeicher für Kühlmittelaustausch, angeboten von Daimler und VW als Händlereinbau. Der von BMW in Zusammenarbeit mit Modine entwickelte Latentwärmespeicher wurde wie oben erwähnt aufgrund von Dichtigkeits- und dadurch verursachten Korrosionsproblemen nicht weiter verfolgt. Aus fertigungstechnischer Sicht scheint je nach Speicher material die Dichtigkeit nicht sichergestellt zu sein.

Für BEV könnte während des Ladens der Batterie an der Ladestation gleichzeitig der Wärmespeicher aufgeladen und idealerweise dabei auch direkt der Fahrgastraum und die Traktionsbatterie thermisch vorkonditioniert werden.

Als wärmespeichernde Materialien kommen Parafine, Salze, Gashydrate, Wasser sowie Zucker-Alkohole zum Einsatz. Bei der Auswahl des konkreten Materials sind neben Schmelztemperatur, Schmelzenthalpie etc. auch Toxizität und Entflammbarkeit wichtige Kriterien.

### 5.3.2 Kühlkonzepte: Energiewandler und -speicher

#### 5.3.2.1 Kältemittelkreislauf, Kompressionskältemaschine

Kompressions-Kältemaschinen werden momentan in allen Antriebskonzepten zur Kühlung des Fahrgastraums und teilweise zur Batteriekühlung eingesetzt. Sie bestehen, wie die Wärmepumpe, aus Verdampfer, Kompressor, Kondensator, Drossel (Expansionsventil oder Kapillarrohr), Kühlmittel und Leitungen. Das Kühlmittel verdampft nach der Drossel und nimmt im Verdampfer Wärme auf. Aufgrund der Verdichtung im Kompressor steigt die Temperatur des gasförmigen Kühlmittels. Im folgenden Kondensator wird Wärme vom Kühlmittel an die Umgebungsluft abgegeben, wobei das Kühlmittel vollständig kondensiert. Anschließend folgt wieder die Drossel und der Kreislauf beginnt aufs Neue.

Aufgrund der geplanten Umstellung des Kältemittels von R134a auf R1234yf sind nur geringe bauliche Modifizierungen der Klimaanlagekomponenten erforderlich (Mardorf et al. 2010). Der Verdichter wird in Elektrofahrzeugen im Gegensatz zu ICV nicht mehr mechanisch über den Verbrennungsmotor, sondern über einen integrierten Elektromotor angetrieben. Der Fertigungsaufwand steigt hierdurch jedoch.

#### 5.3.2.2 Kältespeicher

Kältespeicher werden bereits heute in den Speicherverdampfern der Firma Behr eingesetzt (Manski et al. 2006). Diese sorgen bei Micro- und Mild-Hybriden dafür, dass auch während kurzer Motorstillstände (z. B. an der Ampel) der Fahrgastraum gekühlt wird. Andernfalls müsste bei Fahrzeugstillstand der Verbrennungsmotor extra zum Betrieb des Klimakompressors weiter betrieben bzw. wieder frühzeitig gestartet werden. Der Speicherverdampfer wird also in Kompressions-Kältemaschinen zur Überbrückung von bis zu einer Minute dauernden Motorstillständen eingesetzt.

Wie auch bei den Wärmespeichern sind auch als Kältespeicher v. a. Phasenwechselmaterialien interessant. Elektrofahrzeuge können analog zu Wärmespeichern auch mit Kältespeichern ausgestattet werden. Eine fahrzeugseitige Kompressions-Kältemaschine scheint allerdings weiterhin sinnvoll. Über diese lässt sich der elektrische Strom der Ladestation in Kälte umwandeln, den Kältespeicher beladen und den Fahrgastraum vorkonditionieren. Konkrete Anwendungen sind hierzu nicht bekannt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die verschiedenen Fahrzeug- bzw. Antriebskonzepte jeweils verschiedene Heiz- und Kühlkonzepte denkbar und bereits auf dem Markt verfügbar sind. Welche Konzepte sich durchsetzen werden, ist momentan noch nicht abzusehen. Entsprechender Entwicklungsbedarf besteht für die in Kapitel 5.1 genannten Teiltechnologien. Im Hinblick auf standortseitige Wertschöpfungsvorteile scheint Forschungsaktivität bei Material- bzw. Speicherthemen sinnvoll platziert.

## 5.4 Entwicklungspotentiale bei Heiz- und Kühlstrategien

Nach Einschätzungen der Workshopteilnehmer (Workshop 4) sind die Kunden ein sehr wichtiger Einflussfaktor für den Erfolg bzw. Misserfolg der Elektromobilität. Sie werden mit hohen Erwartungen bezüglich

des Komforts und der Wirtschaftlichkeit in Abhängigkeit des Fahrzeugsegmentes beschrieben. Differenziert wird nach Weltregionen. Mögliche Lösungen werden im Bereich der Wärmespeicher, einer Minimierung der Verlustwärmeströme („Passivauto“), des zielgerichteten Heizens, des ‚intelligenten‘ Thermomanagements unter umfassender Nutzung jeglicher Abwärmequellen sowie der thermischen Vorkonditionierung gesehen.

Workshop-Ergebnisse zu Forschungsbedarfen und deren Priorisierung:

1. Minimierung der Energieverluste im Fahrgastraum (8 Nennung)
2. Abwärmenutzung des elektrischen Antriebsstrangs (7 Nennungen)
3. Verbesserte, objektivierte Erfassung des Klimakomforts/Wohlfühlfaktoren als Ziel für neue Normen und Spezifikationen (5 Nennungen)
4. Neue Wärmespeichermaterialien und -konzepte (4 Nennungen)
5. Entwicklung neuer Wärmespeichermaterialien
  - Wärmespeicherkonzepte, z. B. thermische Vorkonditionierung von BEV
  - Lösung von Dichtungs- und Korrosionsproblemen
  - Entwicklung saisonabhängiger Klima/Reichweiten-Module (4 Nennungen)
6. Materialentwicklung (3 Nennungen)
  - Integrierte thermische Struktur-Eigenschaften
  - Einstellbare Schichten (optisch/thermisch)
7. Alternative Wärme-/Kälte-Erzeugung: Wärmepumpen, Kaltdampfprozess, thermoelektrische Kühlung (3 Nennungen)
8. Systematische Untersuchung und Klassifizierung von Phasen-Übergangs-Systemen (2 Nennungen)
9. CO<sub>2</sub>-Aufspaltung „beyond Umluftsteuerung“ (2 Nennungen)
10. Batterieforschung „offene Systeme“ (2 Nennungen)
11. Thermisch optimiertes Fahrzeugdesign (1 Nennung)

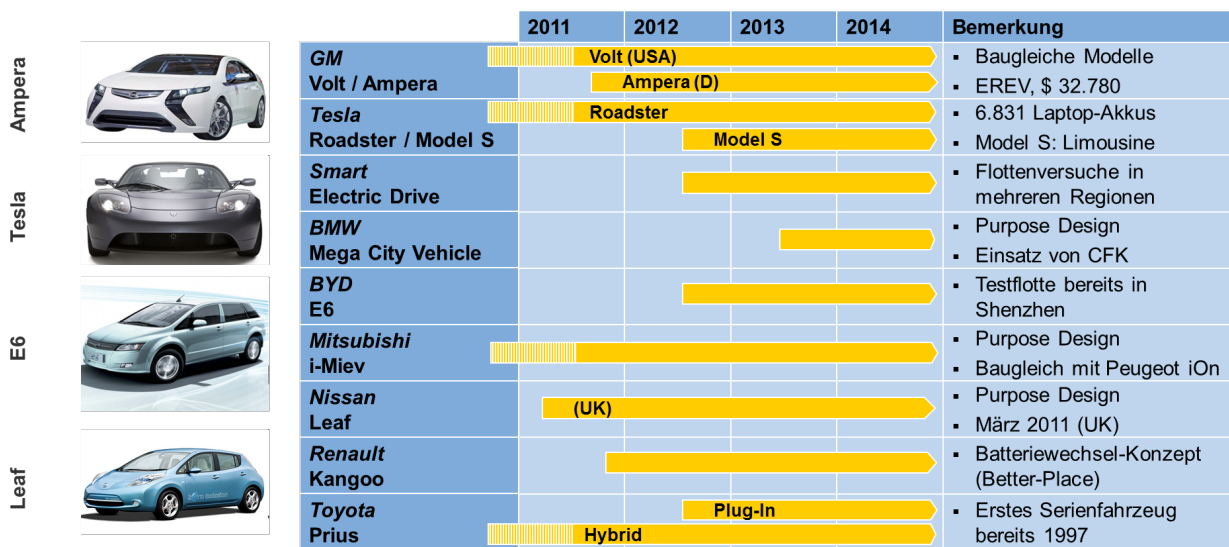
Ergänzend zur eben aufgeführten Liste besteht Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Kopplung von Wärmequellen und -senken.

Das Thema Thermomanagement, wozu auch das Heizen und Kühlen des Fahrgastraumes gehört, ist bereits in den vergangenen Jahren aufgrund der zunehmenden Wirkungsgradsteigerung der Verbrennungsmotoren in das Interesse der Industrie und Forschungseinrichtungen gerückt. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges wird dieses Thema noch an Bedeutung gewinnen, weshalb auch bei der Ausbildung von Facharbeitern und Ingenieuren hierauf verstärkt Wert gelegt werden muss.

## 6 Wettbewerb der Elektrifizierungs-Strategien

Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist die Quantifizierung der Potentiale elektrifizierter Fahrzeugantriebe im Sinne einer Marktbetrachtung. Diese Analyse liefert in der abschließenden Relevanzuntersuchung die Grundlage für die Analyse der unterschiedlichen benötigten Fahrzeugkomponenten. Darauf aufbauen gelang es, zukünftig notwendigen Forschungsbedarfs zu benennen und zu quantifizieren.

In einem sich wandelnden Mobilitätsnetzwerk werden voraussichtlich konkurrierende Antriebssysteme parallel existieren. Die bisher bekannte Dominanz von konventionellen Verbrennungsfahrzeugen wird – zumindest in einer Übergangsphase – um unterschiedliche elektrifizierte Fahrzeugantriebe und hybridelektische Antriebsassistenten ergänzt werden. Die Mehrheit der Automobilhersteller hat eine Vielzahl an Fahrzeugkonzepten für die kommenden Jahre veröffentlicht. Abbildung 6.1 zeigt eine exemplarische Auflistung welche elektrifizierten Fahrzeugkonzepte von den Automobilherstellern für die nächsten Jahre angekündigt wurden.



**Abbildung 6.1: Exemplarische Auflistung der für die kommenden Jahre angekündigten elektrifizierten Fahrzeugkonzepte.**

Quelle: Herstellerangaben, DLR-Analyse.

Das Mobilitätssystem selbst wird sich darüber hinaus durch neue technologische Möglichkeiten sowie innovative Geschäftsmodelle wandeln. Unterschiedlichste Treiber in Politik, Wirtschaft sowie der Gesellschaft selbst lassen sich hierbei identifizieren. So sind bereits heute in den meisten Großstädten Car-sharing-Dienste etabliert, die durch ihre Geschäftsmodelle auf spezielle Kundenwünsche abzielen. Der damit verbundene langsame Wandel weg von einem Allround-Fahrzeug hin zu einem spezialisierten und in Zukunft eventuell elektrisch betriebenen Fahrzeug für eine spezielle Kundengruppe hat begonnen. Die Ausweitung des intermodalen Personenverkehrs wird in diesem Zusammenhang zukünftig zunehmen.

Um die mögliche zukünftige Entwicklung und den Forschungsbedarf für die technischen Komponenten zu quantifizieren, ist es in diesem Zusammenhang erforderlich, den Fokus auf die Konkurrenzsituation von konventionellen Antrieben und neu in den Markt eintretenden alternativen bzw. elektrifizierten Antriebskonzepten zu richten. Hierbei sollen technische Fragestellungen und Entwicklungspotentiale der vorangegangenen Analysen aufgegriffen und berücksichtigt werden. Am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte wurde in den vergangenen Jahren ein szenarienbasiertes Simulationsmodell entwickelt, welches die Konkurrenzsituation

tuation auf dem deutschen Neufahrzeugmarkt abbilden und daraus Marktanteile zukünftiger Fahrzeugantriebe errechnen kann. Dieses Tool konnte im Rahmen dieser Studie zur Quantifizierung der zukünftigen Marktdurchdringungen herangezogen werden. Im Folgenden wird zur strukturierten Anknüpfung der weiteren Arbeitsschritte eine Einführung in das Modell gegeben werden.

## 6.1 Das Fahrzeugtechnik-Szenariomodell *VECTOR21*

Das szenariobasierte Simulationsmodell *VECTOR21* (Vehicle Technologies Scenario Model) ist in der Lage, die Konkurrenzsituation zwischen konventionellen Fahrzeugen und alternativen Antriebskonzepten auf dem deutschen Neufahrzeugmarkt abzubilden. Hierzu werden frei definierbare Fahrzeuge den Kundenanforderungen in einem szenarioabhängigen Marktumfeld gegenübergestellt. Auf Basis eines Lebenszykluskostenansatzes wird so für 900 Kundengruppen das günstigste und gleichzeitig umweltfreundlichste Fahrzeug ermittelt.

Die Fahrzeuge sind frei definierbar, wobei sich alle derzeit diskutierten Antriebsstrangkonzpte abbilden lassen. So sind beispielsweise im Hinblick auf zukünftige elektrifizierte Fahrzeugkonzepte unterschiedliche Batteriegrößen, unterschiedliche Leistungsgrößen der elektrischen Maschinen oder auch unterschiedliche Leistungen von Brennstoffzellensystemen definierbar. Als Datenbasis für historische Größen des Neufahrzeugmarktes dienen statistische Daten aus Veröffentlichungen des Kraftfahrtbundesamtes (KBA), dem Transport Emissions Model (TREMOD) sowie der „conservation of clean air and water in europe“-Initiative (CONCAWE). Mit Hilfe dieser Daten ist es möglich, nicht nur die Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes sondern darüber hinaus auch die damit verbundenen Umschichtungen in der gesamten Fahrzeugflotte zu bestimmen.

Die Kosten der jeweiligen Fahrzeugtechnologien werden auf Basis vorangegangener Analysen in das Modell eingepflegt. Hierbei ist es eine Besonderheit des Modells, dass Kosten für innovative Technologien modellintern unter Berücksichtigung der im Zeitverlauf verkauften Stückzahlen auf Basis von Lernkurven berechnet werden. Die Lernkurven spiegeln hierbei die in Abhängigkeit der kumulierten Produktionsmenge zu erwartenden Kostendegressionen wieder. Gleichzeitig lässt sich ebenfalls in Abhängigkeit der produzierten Stückzahlen eine herstellerseitige, interne Subvention definieren, welche im Zeitverlauf automatisch reduziert wird, bis eine Zielmarge erreicht ist. Gesamte Fahrzeuge werden so über alle ihre technischen Eigenschaften (z. B. Energiegehalt der Batterie, Leistung der Elektromaschine etc.) auf Komponentenebene im Modell zusammengestellt. Somit ergeben sich dynamische Anschaffungskosten, die je nach Szenarioverlauf signifikant abweichen können. Um den politischen Einflussfaktoren Rechnung zu tragen, besteht die Möglichkeit, szenarioabhängige Steuern und Subventionen zu definieren. Die vieldiskutierte Einführung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten für Neufahrzeuge und die damit verbundenen potentiellen Strafzahlungen fließen ebenso in das Modell ein wie mögliche Einmalzahlungen beim Kauf eines Elektrofahrzeugs.

Variable Kosten werden in *VECTOR21* in Abhängigkeit von 900 verschiedenen Kundengruppen definiert. Die Merkmalsausprägungen der Kundengruppen umfassen hierbei die jährliche Fahrleistung, die Einteilung zu Fahrzeuggrößenklassen sowie die Zahlungsbereitschaft für umweltfreundliche respektive CO<sub>2</sub>-arme Antriebe. Haupteinflussfaktor auf die variablen Kosten sind neben den jährlich zu entrichtenden Steuern die Kosten für Kraftstoffe. Diese Kosten sind szenarioabhängig definiert und stützen sich auf den hinterlegten Ölpreis sowie die im Szenario angenommenen Erzeugungsketten für Elektrizität und Wasserstoff. Kombiniert mit der jährlichen Fahrleistung der Nutzer und dem Energiebedarf des jeweiligen Antriebskonzeptes ergeben sich so für jeden Kundentyp und für jedes Fahrzeug individuelle variable Kosten.

Um der fortschreitenden technischen Entwicklung wie beispielsweise der Verringerung von Fahr- und Antriebswiderständen, der Einführung von Leichtlaufreifen und vor allem der Realisierung von Gewichtseinsparungen Rechnung zu tragen, besteht die Möglichkeit Kraftstoffsparooptionen für die jeweiligen

Fahrzeugkonzepte zu definieren. Hierdurch werden den Kundengruppen Auswahloptionen eröffnet, die auf der einen Seite mit Mehrkosten bei der Anschaffung verbunden sind, auf der anderen Seite aber auch Reduktionen bei Verbrauch (und Emissionen) bedingen. Letztlich wird die Situation auf dem Neufahrzeugmarkt dadurch realistisch abgebildet.

Der Entscheidungsalgorithmus von *VECTOR21* bezieht alle diese Charakteristiken ein und wählt aus den auf dem Markt zur Verfügung stehenden Fahrzeugen das für den jeweiligen Kunden geeignete aus. Resultat sind hierbei Marktzusammensetzungen der zukünftigen Neufahrzeugflotte. Darüber hinaus lassen sich mittels vertiefender Analysen weitere Details wie die Umschichtung der gesamten Fahrzeugflotte oder die realisierten CO<sub>2</sub>-Reduktionen ermitteln.<sup>6</sup>

## 6.2 Rahmenbedingungen für die Marktentwicklung

Die zukünftige Marktentwicklung hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab: der Angebotsseite, der Nachfrageseite sowie den allgemeinen Marktbedingungen. Im nun folgenden Abschnitt sollen die allgemeinen Randbedingungen, d. h. das Marktumfeld an sich einführend betrachtet werden.

Die auf den Neufahrzeugmarkt einfließenden exogenen Faktoren lassen sich in ökonomische und politische Faktoren differenzieren, wobei die beiden Gebiete im Sinne einer konsistenten Szenarioentwicklung stets als Ganzes zu betrachten sind. Die in der vorliegenden Analyse betrachteten ökonomischen Faktoren umfassen dabei Preise für Rohmaterialien und Infrastrukturentwicklungen. Als Preise für Rohmaterialien werden hierbei im Speziellen die Entwicklung des Ölpreises sowie des Platinpreises – als signifikanter Kostentreiber für die Brennstoffzellenproduktion – einbezogen. Betrachtete politische Faktoren umfassen die Steuergesetzgebung sowie mögliche monetäre Anreizsysteme. Die in der aktuellen politischen Diskussion betrachteten Grenzwerte für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Kilometer von Neufahrzeugen und die damit verbundenen Strafzahlungen werden ebenso berücksichtigt wie Steuererleichterungen für elektrifizierte Antriebe. Staatliche Subventionen als Anreizschema zur schnelleren Markteinführung alternativer Antriebe werden als Einmalzahlungen beim Neufahrzeugkauf szenarioabhängig antizipiert.

Je nach Szenario werden darüber hinaus auch unterschiedliche Ent- und Gestehungspfade von Energieträgern bzw. Kraftstoffen berücksichtigt. Hierbei werden sowohl unterschiedliche Produktionskosten als auch die je nach Produktionspfad variierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen einbezogen. Darüber hinaus wird szenarioabhängig die mögliche Einführung einer Steuer auf Fahrstrom bzw. Fahrwasserstoff diskutiert.

## 6.3 Mögliche Entwicklungen der Neufahrzeugflotte

Im Folgenden sollen drei Szenarien zur möglichen Entwicklung des deutschen Neufahrzeugmarktes mit Hilfe des Simulationstools ermittelt werden. Ausgehend von einem Basisszenario werden mit Hilfe von zwei im Sinne elektrifizierter Antriebskonzepte ehrgeizigen Alternativszenarien Sensitivitäten abgeleitet.

Das Basisszenario beruht auf moderaten technologischen Entwicklungen, wie sie in den vorigen Kapiteln analysiert wurden. Die politischen Rahmenbedingungen spiegeln hierbei ein „Best-guess“-Szenario im Sinne der Umsetzung bereits beschlossener Maßnahmen wider. Beide Alternativszenarien leiten sich von diesem Basisszenario ab, wobei das erste Alternativszenario eine deutlich positive Entwicklung der Batterie-

---

<sup>6</sup> Zu weiteren Ausführungen zu *VECTOR21* vgl. Mock (2010).

technologie antizipiert und somit rein elektrisch angetriebene Fahrzeugkonzepte favorisiert. Das zweite Alternativszenario hingegen verdeutlicht eine sehr positive, aber dennoch denkbare zukünftige Entwicklung hin zu einem hohen Anteil an alternativen Antriebskonzepten aller Art. Beide Alternativszenarien stellen also eine zukünftige Entwicklung mit einem deutlich gesteigerten Anteil elektrifizierter Antriebskonzepte dar.

### 6.3.1 Basisszenario

Das Basisszenario antizipiert wie eingangs erwähnt die Umsetzung von z. Zt. diskutierten und teilweise bereits beschlossenen politischen Maßnahmen wie der Einführung von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten von 130 g CO<sub>2</sub> / km auf EU-Ebene in 2015 und damit verbundenen Strafzahlungen von 95 € / (g CO<sub>2</sub> / km) sowie der Verschärfung dieses Grenzwertes auf 95 g CO<sub>2</sub> / km bis 2020. Diese Entwicklung wird im Zeitraum bis 2040 fortgeschrieben, was zu einer Reduzierung des zulässigen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf 60 g / km in 2040 (auf EU-Ebene) führt. Der Ölpreis steigt in Anlehnung an das IEA-Referenzszenario (IEA 2010) auf 130 Euro pro Barrel bis 2030. Danach entwickelt er sich konstant bis 2040. Die Besteuerung von Kraftstoffen verzeichnet zwei wesentliche zukünftige Veränderungen. In Übereinstimmung mit dem Energiesteuergesetz läuft die derzeit geltende Steuererleichterung auf im Verkehr genutztes Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) in 2018 aus.<sup>7</sup> Darüber hinaus wird zum selben Zeitpunkt schrittweise eine Steuer auf im Verkehr genutzten Strom und Wasserstoff eingeführt. Die Gestehungskosten für Strom selbst basieren auf den im Leitszenario 2010 des Bundesumweltministeriums veröffentlichten Daten (BMU 2010). Preise und Kosten für Wasserstoff basieren auf der EU-Coalition-Studie und repräsentieren einen moderaten Entwicklungspfad (McK 2010). Im Basisszenario werden keine einmaligen, staatlichen Subventionszahlungen beim Kauf eines Neufahrzeuges antizipiert.

Die Fahrzeuge und der damit verbundene Energiebedarf wurden mit Hilfe von Modelica und der am DLR entwickelten AlternativeVehicles-Bibliothek ausgelegt. Die Leistungsklassen sowie die Energieinhalte der Batterien der Fahrzeuge in den drei Größenklassen entsprechen hierbei den Ankündigungen der Automobilhersteller. Hierbei wurden die Fahrzeuge im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ausgelegt und sind somit vergleichbar mit den anvisierten CO<sub>2</sub>-Grenzwerten. Insgesamt wurden in jeder Größenklasse 10 Antriebskonzepte berücksichtigt. Neben den konventionellen Fahrzeugkonzepten Benzin (Gasoline, ‚G‘), Diesel (‚D‘) und Erdgas (‚CNG‘) sowie deren hybridisierten Varianten (hybrid electric vehicle, ‚HEV‘) wurden vier Arten von elektrifizierten Fahrzeugantrieben betrachtet. Plug-In-Hybride (‚PHEV‘) stellen hierbei als Parallel-Hybride mit einer im Vergleich zu Benzin-Hybridfahrzeugen größeren Batterie und darüber hinaus einem Netzanschluss zum Nachladen der Batterie die Schnittstelle zwischen hauptsächlich verbrennungsmotorisch und rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen dar. Range-extender-Fahrzeuge (‚EREV‘) sind als serielle Hybridfahrzeuge ausgelegt und besitzen eine abermals größere Batterie. Der Verbrennungsmotor dient hierbei wie bei seriellen Hybriden üblich nur zum Aufladen der Batterie und hat keine mechanische Verbindung zu den Rädern. Reine Batteriefahrzeuge haben die größte Batterie und besitzen neben dem Elektromotor keinen zweiten Energiewandler. Brennstoffzellenfahrzeuge sind mit einer Brennstoffzelle und einer sehr kleinen Batterie als Energie- und Leistungspuffer ausgestattet. Abbildung 6.2 gibt einen Überblick über die getroffenen Szenarioannahmen im zeitlichen Verlauf.

---

<sup>7</sup> Vgl. Energiesteuergesetz. Die getroffenen Annahmen beruhen auf dem aktuell gültigen Gesetz, eine eventuelle (derzeit politisch diskutierte) Verlängerung der Steuererleichterung wird also nicht antizipiert.

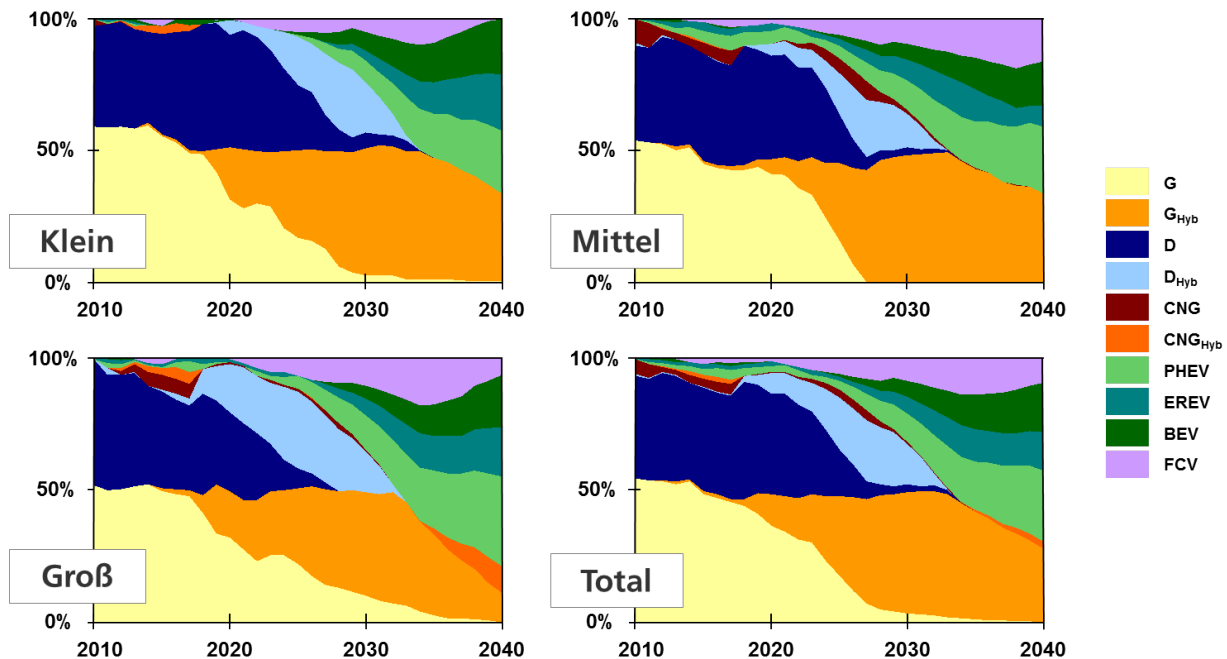


Szenarioannahmen		2010	2020	2030	2040	Quelle
Ölpreis	[€/bbl]	80	100	130		DLR-Analyse
CNG Steuer	[%]	20	ab 2018: 100			Gesetzgebung
Elektrizitätspreis	[€ ct/kWh]	21,5	34,1	37,3	36,4	„Leitszenario 2010“ 100% EE
H <sub>2</sub> -Preis	[€ ct/kWh]	22,3	39,0	37,6	36,5	Berechnung
Anteil H <sub>2</sub> aus Elektrolyse	[%]	100%				DLR-Analyse
CO <sub>2</sub> -Intensität Elektrizität	[g/kWh]	540	510	21 (ab 2025)		„Leitszenario 2010“, 100% EE ab 2025
CO <sub>2</sub> -Intensität H <sub>2</sub>	[g/kWh]	648	612	25 (ab 2025)		Berechnung
CO <sub>2</sub> -Ziel (EU-Ebene)	[g CO <sub>2</sub> /km]	2015: 130	95	70	60	Gesetzgebung, BMU
CO <sub>2</sub> -Strafe	[€/ (g CO <sub>2</sub> /km)]	95				Gesetzgebung, DLR-Analyse
Willingness-to-pay	[%]	0-20				Rogers, Verbraucheranalysen
Verteilung der Segmente	[S/M/L %]	(25/55/20)	(28/50/22)	(30/45/25)		KBA

Abbildung 6.2: Szenarioannahmen im AELFA-Basiszenario.

Aufgrund der getroffenen Annahmen zeigt das Szenario eine langsame Umschichtung des Neufahrzeugmarktes hin zu elektrifizierten Antriebssträngen. Bis zum Jahr 2030 werden ca. 31% der verkauften Fahrzeuge mit einem signifikanten elektrischen Vortrieb ausgestattet sein (PHEV, EREV, BEV sowie FCV). Bis sich diese Fahrzeuge am Markt behaupten können, werden zunächst die konventionellen Antriebe (Benzin und Diesel) durch ihre hybriden Varianten ersetzt. Die wachsenden Stückzahlen der Hybridfahrzeuge sorgen für einsetzende Lernkurven und den damit verbunden Kostendegressionen bei Lithium-Ionen-Batterien und ebnen so den Weg für Fahrzeugkonzepte mit größeren Traktionsbatterien. Die Marktsegmentierung zwischen Diesel- und Benzinfahrzeugen bleibt – sofern man konventionelle Fahrzeuge und deren hybride Varianten zusammenfasst – über einen langen Zeitraum konstant. Erst mit dem einsetzenden Wachstum alternativer Antriebskonzepte verlieren zunächst Diesel-basierte Fahrzeuge Marktanteile. Bis zu Beginn der 2030er Jahre setzt sich diese Kannibalisierung der Marktanteile bis zu den Benzin-basierten Fahrzeugen durch. Erdgasfahrzeuge werden bereits in 2018 mit dem Auslaufen der Steuererleichterung auf Erdgas-kraftstoff nahezu vollständig aus dem Markt verdrängt.

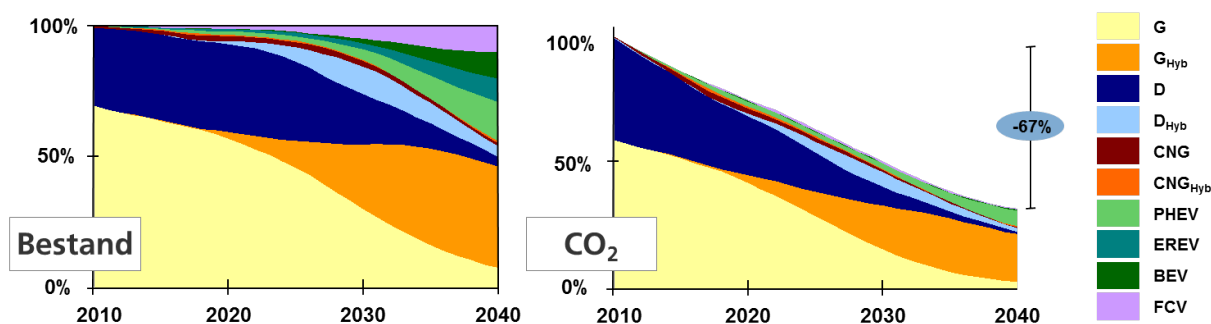
Die Marktentwicklungen ähneln sich in allen drei Fahrzeugsegmenten, wobei die Entwicklung hin zu elektrifizierten Fahrzeugkonzepten im kleinen Segment aufgrund der geringeren Fahrleistungen und dem damit verbundenem höheren Anteil an fixen Kosten an den Gesamtausgaben der Nutzer einige Jahre später einsetzt. Im Jahr 2040 liegt der Anteil aller hybridisierten Fahrzeugkonzepte ( $G_{Hyb}$ ,  $D_{Hyb}$ ,  $CNG_{Hyb}$ , PHEV, EREV) bei etwa drei Vierteln des Marktes. 75% der verkauften Fahrzeuge werden zu diesem Zeitpunkt also mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sein. Abbildung 6.3 zeigt das Ergebnis der VECTOR21-Berechnung für die drei Größensegmente („small“, „medium“, „large“) sowie für den Gesamtfahrzeugmarkt („all“) bis 2040.



**Abbildung 6.3: Marktsegmentierung nach Antriebsarten und Fahrzeugsegment des deutschen Neufahrzeugmarktes im AELFA-Basisszenario.** (Fahrzeuge: G: Benzin, D: Diesel, CNG: Erdgas, Hyb: Hybride Varianten, PHEV: Plug-in-Hybride, EREV: Range-extender, BEV: Batterie, FCV: Brennstoffzelle)  
Quelle: DLR.

Betrachtet man zusätzlich zum Neufahrzeugmarkt die gesamte deutsche Fahrzeugflotte, so wird deutlich, dass die Umschichtung im Fahrzeugbestand sehr viel langsamer einsetzen wird.<sup>8</sup> Bis zum Jahr 2020 werden dennoch etwa 1,4 Millionen Elektrofahrzeuge (PHEV, EREV, BEV und FCV) in der Flotte vertreten sein. Insgesamt lassen sich die well-to-wheel-CO<sub>2</sub>-Emissionen so bis 2040 auf Flottenebene im Vergleich zu 2010 auf ein Drittel reduzieren. Hierbei sind zwei wesentliche Effekte maßgebend. Zum einen werden Emissionen durch die hohe Anzahl an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen in Verbindung mit durch erneuerbare Energien hergestellten Traktionsstrom bzw. -wasserstoff signifikant reduziert. Zum anderen wird aber auch die Effizienz konventioneller Verbrennungsmotoren nicht zuletzt auch aufgrund von strengeren Abgasnormen weiter verbessert. Abbildung 6.4 stellt für das AELFA-Basisszenario die Umschichtung der gesamten deutschen Fahrzeugflotte sowie die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Reduktionen dar.

<sup>8</sup> Die Berechnung des gesamten Fahrzeugbestandes erfolgt hierbei wie eingangs beschrieben modellintern auf Basis von antriebsstrangabhängigen Überlebenswahrscheinlichkeiten.



**Abbildung 6.4: Veränderung des gesamten Flottenbestands (links) sowie die damit verbundene Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im AELFA-Basisszenario.**

Quelle: DLR.

### 6.3.2 BEV-Szenario

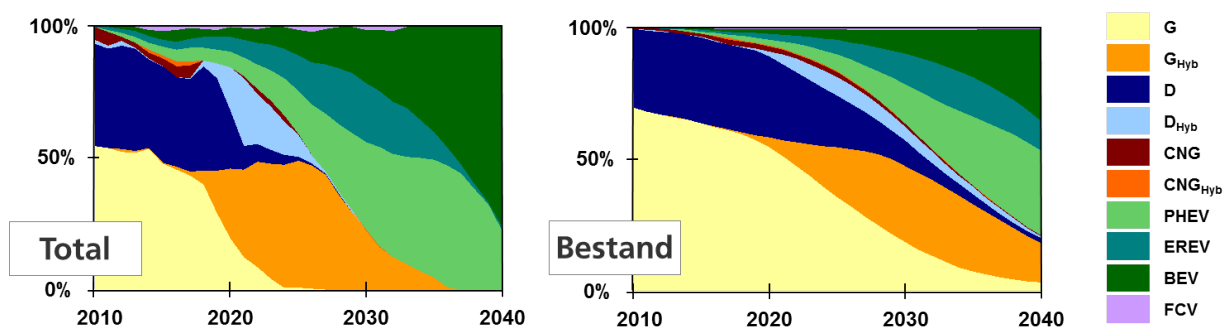
Wie eingangs erläutert, sollen im Folgenden ausgehend vom Basisszenario zwei Alternativszenarien zur Ableitung von Sensitivitäten ermittelt werden. Das erste Alternativszenario unterstellt hierbei eine sehr positive Entwicklung der Batterietechnologie und dient damit zur Ableitung von Wirkungen, die sich insbesondere durch einen signifikant gesteigerten Marktanteil von reinen Batteriefahrzeugen ergeben. So wird in diesem Szenario antizipiert, dass sowohl die Batterietechnologie an sich, also Energie- und Leistungsparameter, als auch die Produktionskosten der Batterien eine progressivere Entwicklung durchlaufen als im Basisszenario. Dies hat zur Folge, dass die in elektrifizierten Antriebssträngen verbauten Batterien nicht nur billiger werden, sondern dass auch die Verbrauchswerte dieser Fahrzeuge eine Reduktion erfahren. Darüber hinaus wurde im Sinne eines für rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge positiven Szenarios die Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur und der Abdeckung von Wasserstofftankstellen erhöht. So wurden beide Werte über die Zeit bis 2040 von 70% Verfügbarkeit im Basisszenario auf jeweils 100% Verfügbarkeit im Alternativszenario gesteigert. Um zudem die Angebotsseite des Marktes den geänderten Randbedingungen anzupassen, wurde antizipiert, dass der Aufbau von Produktionskapazitäten für alternative Fahrzeugkonzepte schneller vollzogen werden kann.

Durch diese veränderten Annahmen lässt sich insgesamt beobachten, dass der Markteintritt elektrifizierter Fahrzeugkonzepte deutlich schneller einsetzt. Bis es zur Kannibalisierung der konventionellen Antriebe kommt sind dennoch die gleichen Mechanismen wie bereits im Basisszenario zu erkennen. Zum einen bleibt das Verhältnis zwischen Benzin- und Dieselfahrzeugen nahezu konstant. Zum anderen werden herkömmliche Verbrennungsmotoren durch ihre hybridisierten Varianten ersetzt. Darüber hinaus dienen auch hier die Hybridkonzepte als Übergangslösung respektive Wegbereiter, wobei auch hier der schnellere Wandel des Neufahrzeugmarktes beobachtbar ist und Hybridfahrzeuge ohne Netzanschluss bis 2040 bereits aus dem Markt verdrängt wurden.

Eine wesentliche Veränderung gegenüber dem Basisszenario besteht in der Entwicklung der Marktanteile von Brennstoffzellenfahrzeugen. Durch die im Alternativszenario reduzierten Kosten für Batterien sind Brennstoffzellenfahrzeuge mit ihrer relativ geringen Größe von Traktionsbatterien nicht mehr konkurrenzfähig.

Bis 2030 lässt sich insgesamt ein Marktanteil an hauptsächlich elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (PHEV, EREV, BEV und FCV) von knapp 80% beobachten, wobei der Anteil von reinen Batteriefahrzeugen auf 20% deutlich angewachsen ist. Wie bereits im Basisszenario erfolgt auch hier die Umschichtung im Fahrzeugbestand hin zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugkonzepten deutlich langsamer. So beträgt der Be-

stand an Fahrzeugen mit einem signifikanten Anteil von elektrischer Antriebsleistung (PHEV, EREV, BEV, FCV) 2,9 Millionen Fahrzeuge in 2020. Bis 2040 wächst diese Durchdringung bis auf etwa 80% an.

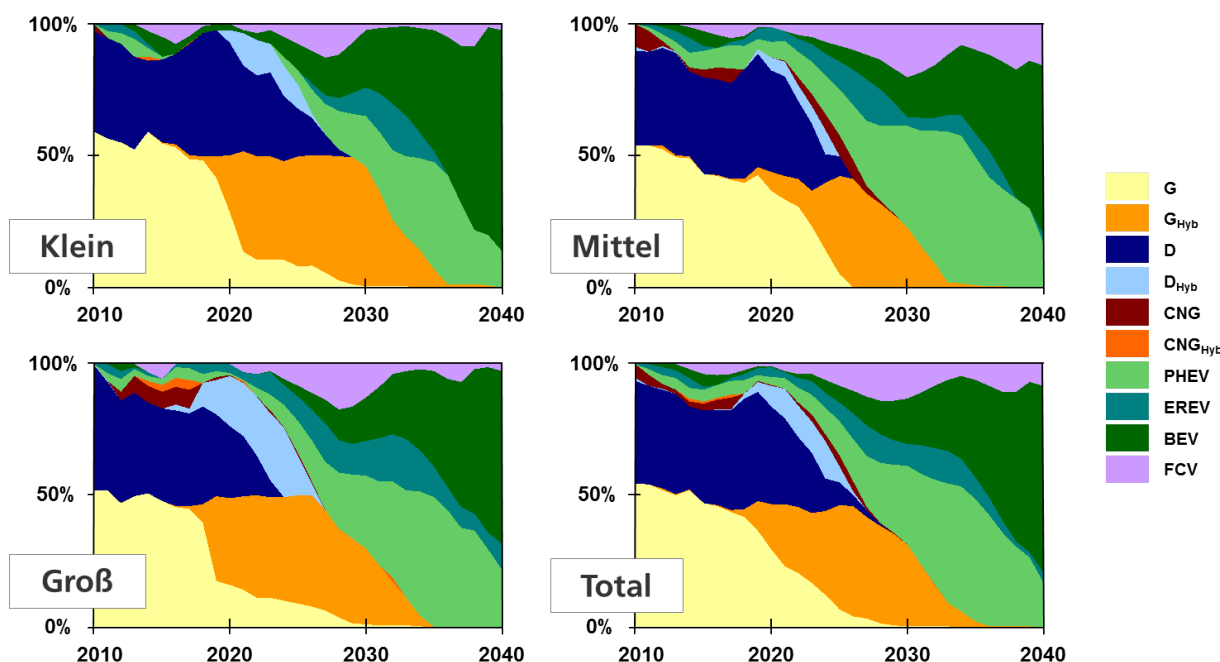


**Abbildung 6.5: Entwicklung des gesamten Neufahrzeugmarktes (links) sowie des Flottenbestands im ersten AELFA-Alternativszenario.**

Quelle: DLR.

### 6.3.3 Acceleration-Szenario

Das zweite Alternativszenario leitet sich ebenfalls aus dem Basisszenario ab. Allerdings fokussiert sich dieses Szenario nicht ausschließlich auf die Entwicklung der Batterietechnologie, sondern antizipiert in allen Belangen eine im Sinne elektrifizierter Antriebskonzepte positive Entwicklung der Randbedingungen. So wurden wie bereits im ersten Alternativszenario die Verfügbarkeit von Lade- und Wasserstoffinfrastruktur erhöht sowie die Kosten- und Leistungsdaten für Traktionsbatterien schneller verbessert. Darüber hinaus wurde aber auch eine raschere Verbesserung der Kosten- und Leistungsparameter von Brennstoffzellensystem antizipiert. Um ein mögliches strikteres politisches Eingreifen zu berücksichtigen, wurden die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Neufahrzeuge auf EU-Ebene bis 2040 sukzessive auf 50 g CO<sub>2</sub> / km gesenkt, wobei die Strafzahlung pro Gramm konstant bei 95 € gehalten wurde. Gleichzeitig wird diesen verschärften Randbedingungen durch staatliche Subventionen beim Kauf eines Elektrofahrzeugs entgegengewirkt. Diese Subventionen werden für BEV und FCV in den ersten fünf Jahren nach Markteinführung in Höhe von anfangs 4000 € mit einer schrittweisen Reduktion auf 1000 € pro Fahrzeug im letzten Jahr der Subventionszahlung angenommen. Für PHEV und EREV werden Subventionszahlungen in halber Höhe antizipiert. Neben den technologischen und politischen Veränderungen wird einer möglichen Verteuerung des Ölpreises Rechnung getragen. So wird mit einem im Vergleich zum Basisszenario beschleunigten Anstieg des Ölpreises von 80 € pro Barrel in 2010 auf 160 € pro Barrel in 2040 gerechnet.

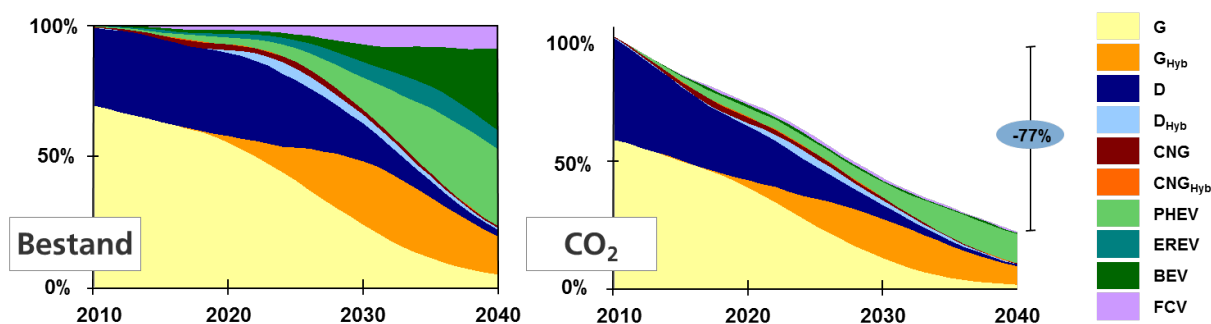


**Abbildung 6.6: Marktsegmentierung nach Antriebsarten und Fahrzeugsegment des deutschen Neufahrzeugmarktes im zweiten AELFA-Alternativszenario.** (Fahrzeuge: G: Benzin, D: Diesel, CNG: Erdgas, Hyb: Hybride Varianten, PHEV: Plug-in-Hybride, EREV: Range-extender, BEV: Batterie, FCV: Brennstoffzelle)

Quelle: DLR.

Abbildung 6.6 zeigt das Ergebnis der Simulationsrechnungen unter den oben beschriebenen Szenarioannahmen. Man erkennt auch in diesem zweiten Alternativszenario die gleichen Wirkmechanismen wie bereits im Basisszenario. Allerdings setzt auch hier wie bereits im ersten Alternativszenario die Marktdurchdringung alternativer Antriebe deutlich früher als im Ausgangsszenario ein, wobei insbesondere in der langfristigen Entwicklung reine Batteriefahrzeuge aufgrund der positiven Batterieentwicklung deutlich mehr Marktanteile gewinnen können. Das raschere Einsetzen der Kannibalisierung von konventionellen Antrieben durch elektrifizierte Antriebskonzepte führt dazu, dass bereits um das Jahr 2030 rein verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge vom deutschen Neufahrzeugmarkt verschwunden sind. Damit ist dieses Szenario als erfüllbar, wenngleich allerdings an der oberen Grenze des real Erreichbaren einzustufen. Trotz der – im Sinne von elektrifizierten Antrieben – positiven Annahmen hinsichtlich der Randbedingungen, werden Brennstoffzellenfahrzeuge zwar Marktanteile behaupten können, allerdings nicht über eine signifikante Marktdurchdringung verfügen. Insgesamt beträgt der Anteil alternativer Antriebe (PHEV, EREV, BEV und FCV) am Neufahrzeugmarkt in 2030 knapp 70%.

Betrachtet man die Entwicklung des gesamten Flottenbestands (Abbildung 6.7), so sieht man, dass sich durch die schneller einsetzende Substitution von konventionellen Antrieben auch der Fahrzeugbestand folgerichtig deutlich schneller wandelt. Mit 2,3 Millionen rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (BEV und FCV) in der Flotte bis 2020 wird das Ziel der Bundesregierung deutlich übertroffen. Durch die schnelle Umschichtung des Flottenbestandes in Kombination mit der Weiterentwicklung bzw. Effizienzsteigerung konventioneller Verbrennungsmotoren und den im Szenario unterstellten auf erneuerbaren Energieträgern beruhenden Produktionsketten von Traktionsstrom und –wasserstoff können die Emissionen der deutschen Flotte bis 2040 so um mehr als drei Viertel im Vergleich zu 2010 reduziert werden.



**Abbildung 6.7: Veränderung des gesamten Flottenbestands (links) sowie die damit verbundene Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im zweiten AELFA-Alternativszenario.**

Quelle: DLR.

#### 6.3.4 Kommentierung der Szenarien

Die Szenarioanalysen stehen nicht anstelle von Prognosen, vielmehr geben sie Auskunft über mögliche Zukunftssituationen in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen auf dem Weg dorthin. Sie sind daher ein probates Mittel, um für Entscheider in Politik und Wirtschaft interessierende Sensitivitäten zu verdeutlichen. Interessant ist dabei, auch retrospektiv ausgehend von einem gewünschten Zukunftsziel die Einflussmöglichkeiten und Interdependenzen zu modellieren.

Mit den vorangegangenen Szenarioanalysen wurde deutlich, wie unterschiedlich die Wege hin zu emissionsarmer Mobilität sein können. Ausgehend von einem Basisszenario, welches im langfristigen Betrachtungszeitraum bis 2040 einen diversifizierten Antriebsmix beinhaltet, wurden in einem ersten Alternativszenario zunächst sehr positive Annahmen hinsichtlich zukünftiger Batterietechnologie getroffen. Als Folge dieser positiven Annahmen konnte eine signifikante Verschiebung der Neufahrzeugflotte hin zu reinen Batteriefahrzeugen beobachtet werden. In einem zweiten Alternativszenario wurden neben den Annahmen zur Batterietechnologie weitere Szenarioparameter verändert. Das so beobachtbare Ergebnis zeigt eine signifikant schnellere Verschiebung der Neufahrzeugflotte hin zu elektrifizierten Antriebskonzepten, wobei auch hier ein diversifizierter Mix aus unterschiedlichen Antrieben erhalten blieb.

In allen drei Szenarien kommt es also zu einem breit gefächerten Mix an Antriebstechnologien, wobei in allen Szenarien im Sinne einer elektromobilen Zukunft mindestens 40% Marktanteil an elektrifizierten Fahrzeugantrieben bis 2040 bezogen auf den Neufahrzeugmarkt erzielt werden. Die Berechnungen zeigen darüber hinaus aber auch, dass insbesondere im Basisszenario konventionelle Verbrennungsmotoren bis 2040 eine wichtige Rolle für den Bestand spielen werden.

Für die hier vorliegende Strukturanalyse von Automobilkomponenten konnte die Szenariomethodik *VECTOR21* des DLR genutzt werden, um mit drei Szenarien den zeitlichen Entwicklungsraum begrenzend aufzuspannen und darin jeweils die relevanten Basistrends von Antriebskonzepten zu quantifizieren. Die Analysen wurden ergänzend mit den Experten aus den durchgeführten Workshop-Runden diskutiert und auf Plausibilität überprüft.

Ausgehend von diesen drei möglichen Entwicklungen des deutschen Neufahrzeugmarktes sollen nun im Folgenden Sensitivitäten hinsichtlich der erforderlichen Bauweisen und Werkstoffe abgeleitet werden.

## 7 Relevanz und Forschungsbedarf

Ziel dieses Kapitels ist die Synthese der vorangegangenen Analyseresultate zur Ableitung von möglichen zukünftigen Auswirkungen auf die Industrielandschaft und des damit verbundenen Forschungsbedarfs. Hierzu werden die Ergebnisse der Strukturanalyse zunächst quantifiziert, um in einem zweiten Schritt diese Ergebnisse mit den Resultaten der drei Fahrzeugszenarien zu gewichten. Abschließend wird so eine Identifikation der notwendigen Forschungsbedarfe ermöglicht.

### 7.1 Bewertungsmethode

Um die Auswirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs quantifizieren zu können, wurden im Rahmen der Studie die Hauptkomponenten des Antriebsstrangs detailliert bewertet. Hierzu wurden die Baugruppen hinsichtlich der zur Herstellung benötigten Fertigungstechnologien als auch der eingesetzten Werkstoffe analysiert. Betrachtet wurden analog zur Bewertung in den vorangegangenen Kapiteln die Komponenten Verbrennungsmotor, Elektromaschine, Leistungselektronik, Traktionsbatterie, Brennstoffzelle sowie Getriebe. Hierbei gelang es, die Komponenten anhand 75 unterschiedlicher Fertigungstechnologien<sup>9</sup> sowie 35 verschiedener Werkstoffe zu bewerten.

Die Gewichtung der Ergebnisse und somit die Ermittlung der Relevanz der unterschiedlichen Fertigungstechnologien und Werkstoffe erfolgt mit Hilfe der zuvor errechneten Fahrzeugszenarien. Hierbei werden die jeweiligen Komponenten bzw. die zur Herstellung notwendigen Fertigungstechnologien und Werkstoffe mit den in den drei Marktszenarien erzielten Absatzzahlen der unterschiedlichen Antriebskonzepte gewichtet. Auf Basis der unterschiedlichen Antriebsstrangarchitekturen ergeben sich somit Aussagen, wie sich Technologien und Werkstoffe in den Szenarien entwickeln werden. Hierdurch wird sowohl eine absolute als auch eine relative Analyse der Veränderungen ermöglicht. Relevanz bezieht sich im Fall von Fertigungstechnologien auf den Anteil an der Wertschöpfung am Antriebsstrang, im Fall von Werkstoffen auf die verbaute Masse des jeweiligen Werkstoffs. Die Auswertung der Ergebnisse ist mit einem sehr hohen Detailgrad bis hin zu den einzelnen Größenklassen möglich. Darüber hinaus kann diese Analyse sowohl absolut als auch normiert auf das Ausgangsjahr erfolgen.

Diese Bewertungsmethode wird auf alle drei Fahrzeugszenarien angewandt. Hierbei wird antizipiert, dass sich zwar die Aufteilung des Marktes bzw. die Durchdringung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte von Szenario zu Szenario unterscheidet, die Technologie der Fahrzeuge jedoch unverändert bleibt. Dieses Vorgehen stellt die Vergleichbarkeit der Analyseergebnisse sicher.

Für diese Bottom-Up-Methode müssen die einzelnen Bauteile eines Fahrzeuges, so wie man sie heute kennt, gedanklich in einzelnen Fertigungsschritten gefertigt und deren wertschöpfende Anteile ermittelt werden. Naturgemäß wird keine auf ihre Wettbewerbsvorteile achtende Firma die Fertigungskosten veröffentlichen, sodass bei dieser Methode mit geschätzten Werten gearbeitet werden muss. Die vorliegende Studie greift dazu das Technologie- und Kostenwissen aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten des Auftragnehmers und seiner Partner auf bzw. plausibilisiert dies im Rahmen der durchgeführten Expertengespräche bzw. Workshops. Konsequenterweise soll dabei die Systematik der Schätzung sein. Auch darf der Feinheitsgrad nicht beliebig groß sein. Die oben genannten Hauptkomponenten wurden deshalb in maximal 10 Baugruppen unterteilt, die dann wiederum in ihren 10 wichtigsten Fertigungsschritten bewertet wurden. Die Baugruppen haben dann einen relativen Fertigungsaufwand am Gesamtaufwand der Hauptkomponen-

---

<sup>9</sup> Die vollständige Auflistung der betrachteten Fertigungsverfahren inklusive einer inhaltlichen Beschreibung der jeweiligen Prozesse befindet sich im Anhang.



te, die jeweiligen Fertigungsschritte ihren Anteil an der Baugruppe. Die Materialien sind gemäß ihres Gewichtsanteils in die Baugruppen bzw. Bauteile eingeflossen. Die Fahrzeugkonzepte werden abschließend aus den Hauptkomponenten zusammen gebaut.

Beispielhaft soll das Vorgehen anhand des Elektromotors, der in die Baugruppen Gehäuse, Lagerschild (oder 2. Gehäuseteil), Stator, Rotor, Lager und Rotorlagesensor aufgeteilt ist, verdeutlicht werden. Die hauptsächlich eingesetzten Materialien sind Eisen und Kupfer, Aluminium, Stahl und Elektronik (als verallgemeinerter Anteil für bestückte Leiterplatten, hier speziell die Sensorik und nur als geringer Anteil am Motor). Der Fertigungsschritt Wickeln ist in die Baugruppe Stator eingeflossen, wie es dem Beispiel aus Kapitel 3.3.3 und speziell dem in Abbildung 3.3 dort exemplarisch dargestellten Motor entspricht. Auch das Stanzen ist nur in den Baugruppen Stator und für den gegebenenfalls geblechten Rotor vorhanden. Die anderen Hauptkomponenten sind nach dem gleichen Schema bewertet.

Bei der Bewertung der Verarbeitung von Eisen und Aluminium wurde jeweils unterschieden zwischen Guss- und Nicht-Gussverfahren. Unter der Bezeichnung Aluminium sind so auch Strangprofile und Bleche zu finden. Eisen gibt es in den Varianten Grauguss, Stahlguss, Stahl und Stahlteile, Stahlblech sowie Eisen, wobei letzteres auch für die gestanzten Elektrobleche steht.

Unterschiedliche Fachleute haben nach ihren Kriterien die Beurteilung durchgeführt, so dass systematische Fehler unwahrscheinlich sind. Aus dem oben genannten Grund der unveröffentlichten Fertigungskosten sind Ungenauigkeiten in der anteiligen Beurteilung zwar unausweichlich, sie reduzieren sich aber aus statistischen Gründen auf ein Minimum.

## 7.2 Mitarbeiterqualifikation und -kompetenzen

Wichtige Basis für die Innovationsfähigkeit der lokalen Fahrzeugindustrie in Baden-Württemberg ist der Zugang zu Fachwissen für Führungskräfte (Strategie) und Entwicklungsteams (Umsetzung) sowie die Vernetzung von Firmen und Forschungseinrichtungen zu Kompetenznetzwerken. Der Ansatz, Einzelkompetenzen über die sogenannten TecNets<sup>10</sup> zu verknüpfen, ist ein wichtiger Baustein in dieser Strategie. Es bedarf jedoch einer stetigen Erfolgskontrolle und Nachführung der Prozesse, um die Potentiale der lokalen Unternehmen zu nutzen. Die Wettbewerbssituation von Unternehmen kann zu aufwändigen Parallelentwicklungen und zu wenig effektiver Zusammenarbeit führen. Hier wäre zu untersuchen, ob innovative, eventuell zu entwickelnde Joint-Venture-Geschäftsmodelle Innovations- und Wachstumsimpulse verstärken und Risiken mindern könnten.

Unabhängig von der oben beschriebenen Notwendigkeit zur Kompetenzvernetzung gibt es einen, auch von den Teilnehmern der AELFA-Workshops identifizierten, Qualifikationsbedarf in den Themenfeldern Leichtbau, Multi-Material-Design, Faserverbundbauweisen und -fertigung und in der Verbindungstechnik. Hier gilt es, neben der bereits bestehenden Einbindung fachlicher Inhalte in die Ingenieurausbildung, die Weiterbildungsbedarfe bereits ausgebildeter Ingenieure und Fachkräfte zu bedienen. Die Aus- und Weiterbildung von Werkstattpersonal (z. B. Reparatur von MMD-Strukturen) und die Schulung von Rettungskräften im Hinblick auf die speziellen Gefahren alternativ angetriebener und gebauter Fahrzeuge sind weitere relevante Handlungsfelder.

Im Bereich der elektrischen Antriebe werden Qualifikationen in den Bereichen Hochvoltsicherheit, elektrische Maschinen, Leistungselektronik, Mechatronik, Informatik und Halbleitertechnik in den Vordergrund

---

<sup>10</sup> <http://www.automotive-bw.de>

rücken. Fachübergreifende Kompetenzen bekommen dabei einen hohen Stellenwert. Dies wird für die Grundlagenausbildung, aber auch für die Weiterbildung und speziell für die Überleitung der Erfahrungen aus dem Industriebereich besonders wichtig. Dort gibt es bereits Antriebslösungen mit den oben genannten speziellen Problemstellungen, sei es beim Einsatz von elektrischen Spannungen im Mittelspannungsbereich, in komplexen Antriebslösungen wie in der Automatisierungstechnik oder der Leistungs- oder Mikroelektronik. Die Diskussionen in den Expertenworkshops zeigten, dass es das Ziel sein sollte, die automobilen Anforderungen und die Kenntnisse aus diesen genannten Bereichen schnell in Einklang zu bringen.

Die Problemstellung des Thermomanagements – wozu auch das Heizen und Kühlen des Fahrgastraums gehört – ist bereits in den vergangenen Jahren aufgrund der zunehmenden Wirkungsgradsteigerung der Verbrennungsmotoren in das Interesse der Industrie und Forschungseinrichtungen gerückt. Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstranges wird dieses Thema noch an Bedeutung gewinnen, weshalb auch bei der Ausbildung von Facharbeitern und Ingenieuren hierauf deutlich stärker Wert gelegt werden muss.

## 7.3 Übergreifender Forschungsbedarf

### 7.3.1 Fertigungstechnologien

Fertigungstechnologien sind im Bereich der Fahrzeugstrukturen die Schlüssel, um Werkstoff- und Bauweisenpotentiale in Serienprodukte zu überführen und somit für den Markt nutzbar zu machen. Baden-Württemberg verfügt über starke Unternehmen im Bereich des Werkzeug-, des Maschinen- und des Anlagenbaus und kann auf dieser starken Basis auch neue Technologiefelder erschließen. Hierzu bedarf es jedoch einer funktionierenden Vernetzung von OEMs und Zulieferern, damit sich die Industrie frühzeitig auf kommende Werkstoff- und Bauweisentrends vorbereiten kann.

Ein erkennbarer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in den Herstelltechnologien für Faserverbundwerkstoffe, wo als wichtige Ziele beispielsweise die Vermeidung von Handlegearbeiten und die Verkürzung von Taktzeiten, aber auch die Bereitstellung alternativer, kostengünstiger Faserhalbzeuge, genannt werden können. Weiterhin als relevant zu identifizieren sind die Verbindungstechnologien und die Korrosionsschutzsysteme für Leichtbauwerkstoffe und MMD-Bauweisen, die verfahrens- und anlagentechnisch entwickelt werden müssen. Für großserientechnische Leichtbaulösungen bedarf es energieeffizienter umformtechnischer Verfahren für höchstfeste Stahl- und hochfeste Aluminiumlegierungen sowie Magnesiumanwendungen. Innovative Lösungen zur Fertigungsoptimierung sind erkennbar und könnten ausgebaut werden. Die Einbindung von z. B. geeigneten Wärmerückgewinnungssystemen in Warmumformprozesse könnte Wettbewerbsvorteile im Bereich nachhaltiger Produktionssysteme schaffen. Sie können dann neue teile- und funktionsintegrierte Leichtbauarchitekturen ermöglichen.

Im Bereich der elektrischen Antriebe sind industrielle Fertigungstechnologien bereits etabliert und müssen auf die im Automobilbereich geltenden Anforderungen eingerichtet werden. Während zur Zeit noch von überschaubaren Stückzahlen gesprochen wird, liegt für die Zukunft in der Modularisierung und Standardisierung sowie der Integration ein besonderes Potential, die Kostensituation zu verbessern. Hierfür sind wiederum fachübergreifende Qualifikationen gefragt.

Die Produktion elektrischer Maschinen beruht auf mechanischen Bearbeitungsschritten und unterscheidet sich von der Produktion elektronischer Baugruppen, bei der das Hauptaugenmerk auf dem sensiblen Handling der elektronischen Bauteile liegt, speziell der Sicherheit gegen elektrostatische Auf- bzw.

unkontrollierte Entladung. Dies erlaubt heute zwar die Zusammenführung von Elektronik- und Mechanikproduktion bei kleinen Antrieben (Hilfsantrieben), aber noch nicht bei größeren wie den Fahrtrieben. In der Reduzierung von Gehäusen und Leitungen liegt aber noch ein Kostensenkungspotential. Es besteht daher ein entsprechendes Forschungs- und Entwicklungspotential in der produktionsgerechten Integration von Leistungselektronik in die Motoren.

Ein wichtiges Themengebiet, auf welchem Forschungsbedarf besteht, ist das Gebiet der Traktionsbatterien. Zur Integration des Zellstapels in das Batteriesystem (Packaging, Kühlung etc.) ist bereits Know-how in Deutschland vorhanden, zur Herstellung von Einzelzellen jedoch kaum. Dies ist insofern alarmierend, als dass ein großer Teil der Wertschöpfung und Kosten elektrifizierter Fahrzeugantriebe auf die Produktion der Einzelzellen entfällt. Im Kompetenznetzwerk „Lithium Ionen Batterien“ haben sich verschiedene deutsche Unternehmen, Hochschulen und Forschungszentren zusammengeschlossen, um die gesamte Fertigungskette der Batterieproduktion zu schließen. Dennoch besteht hier nicht nur im Land Baden-Württemberg signifikanter Forschungsbedarf. Von der Grundlagenforschung hinsichtlich heutiger, aber auch zukünftiger Batterietechnologien, wie beispielsweise Lithium-Schwefel- oder Lithium-Luft-Batterien, über die notwendigen Kenntnisse zur Fertigung von Batterien bis hin zur Integration in das Fahrzeug existiert aus heutiger Sicht großer Bedarf, die Forschungsanstrengungen auszubauen. Diese Feststellung wurde von den Experten in den Workshops bestätigt. Insbesondere die intensivierte Vernetzung von Wirtschaft und Forschung sowie der gezielte Einsatz von politischen Maßnahmen wurden als Handlungsfeld definiert.

### 7.3.2 Werkstoffe

Wie in Kapitel 4 beschrieben, ist die Gewichtsreduktion einer der wichtigsten Stellhebel, um den Batterie- und Packagebedarf in elektrifizierten Fahrzeugen zu senken. Werkstofftechnologien, welche dem Ziel dienen, kostenattraktive Leichtbaulösungen und erweitere Funktionalitäten, wie die integrierte Schall- und Wärmedämmung zu ermöglichen, haben eine große Relevanz. Dabei kommt dem intelligenten Multi-Material-Design (MMD) eine wichtige Schlüsselrolle zu. Der Forschungsbedarf auf diesem Gebiet umfasst die gesamte Entwicklungskette. Methoden zur verlässlichen Auslegung und Simulation von MMD-Strukturen inkl. der Verbindungstechnik müssen entwickelt und verbessert werden. Für Hybridbauweisen, welche mehrere Werkstoffe in einem Bauteil kombinieren, gibt es ein hohes Potential, durch werkstofftechnische Weiterentwicklungen, z. B. von umformbaren oder gestaltvariablen Sandwichkernwerkstoffen, zu optimaleren Leichtbaulösungen zu kommen.

Für eine Vielzahl von möglichen Materialkombinationen müssen geeignete Verbindungstechniken bereitgestellt werden. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf den Klebeverbindungen. Für mechanische Verbindungselemente ist in vielen Anwendungsfällen die Frage des Korrosionsschutzes von entscheidender Bedeutung. Der Trend zur Mischbauweise erfordert aktuelle und verlässliche Daten zur Ökobilanz unterschiedlicher Werkstoffalternativen. Des Weiteren müssen Fragen des Recyclings von Misch- und Hybridbauweisen verstärkt untersucht werden, um nicht mittelfristig eine neue Welle von Umweltproblemen auszulösen. Mittelfristig hohe Relevanz im Bereich der Strukturwerkstoffe wird die globale Rohstoffverfügbarkeit haben. Hier ist es notwendig, Potentiale lokal verfügbarer und möglicherweise nachwachsender Rohstoffe konsequenter zu kennen und zu nutzen.

Hohe Relevanz im Bereich der Fahrzeugstrukturen hat das Themenfeld Sicherheit von alternativ angetriebenen Fahrzeugen. Die Sensibilität und Erwartungshaltung der Kunden birgt das Risiko, dass Schadens- und Unglücksfälle zu einer Abkehr von neuen Antriebstechnologien führen. Forschungsbedarf besteht deshalb in der sicheren Einbindung von Batterien und Gasspeichern in die Fahrzeugstruktur. Bestehende Homologationsvorschriften müssen im Hinblick auf neue Risiken, die durch neue, alternative Antriebe entstehen, überprüft und angepasst werden.

Die zunehmende Varianz der Antriebssysteme erfordert die Entwicklung von einfach adaptierbaren Fahrzeugstrukturen und Strukturmodulen. Gegenüber heutigen Strukturbauteilen erfordern die in Kapitel 4.1 beschriebenen erhöhten Anforderungen an Isolierung und NVH-Auslegung vielfältige Grundsatz- und Machbarkeitsuntersuchungen, um einen technologischen Vorsprung in diesen komplexen Themenfeldern zu erarbeiten.

Die Notwendigkeit, verschiedene Werkstoffe in unterschiedlichen Bauweisen (z. B. Sandwich-, Guss-, Blech- oder Profilbauweise) und Funktionen zu kombinieren, erfordert die Entwicklung und Bereitstellung verbesserter Entwicklungs- und Auslegungswerkzeuge, wie z. B. der multidisziplinären Optimierung (MDO), welche Kriterien wie z. B. mechanische Eigenschaften, akustische Eigenschaften, thermische Eigenschaften und die Lebensdauer kombiniert optimiert.

Die Werkstoffe, welche für den Bau und die Funktionalität elektrischer Maschinen benötigt werden, sind heute und auf absehbare Zeit zum größten Teil Eisen und Kupfer. Aluminium wird für die Gehäuse eingesetzt. Wichtiger ist die Verfügbarkeit von Permanentmagnetmaterial im größeren Umfang. In der Szenario-betrachtung dieser Studie sind Permanentmagnete berücksichtigt, d. h. es wurden permanentmagneterregte Maschinen und keine Asynchronmaschinen für die Zukunft angenommen. Spezielle Materialien wie kobaltlegierte Bleche, ALNiCo-Magnete oder Smart Magnetic Composites sind nicht im Szenario enthalten. Sie haben jedoch Beachtung in der Forschung, besonders dort, wo die Optimierung des Einsatzes von Permanentmagnetmaterial in Konkurrenz mit der günstigeren Asynchronmaschine steht. Um die zukünftige Entwicklung im Bereich des Antriebsstrangs bewerten zu können, soll im Folgenden die Veränderung hinsichtlich Werkstoffen und Fertigungstechnologien quantifiziert werden.

## 7.4 Relevanz und Forschungsbedarf

Ziel des folgenden Abschnitts ist die Analyse der zeitlichen Entwicklung der Relevanz von Fertigungstechnologien und Werkstoffen im Antriebsstrang auf Basis der drei Fahrzeugszenarien und letztlich die Ableitung der damit verbundenen Forschungsbedarfe.

### 7.4.1 Fertigungstechnologien

Wie in Abschnitt 7.1 erläutert, erfolgt die Kopplung der Fahrzeugszenarien mit den dazugehörigen Fertigungstechnologien auf Basis von 75 unterschiedlichen Fertigungsarten bzw. -schritten.<sup>11</sup> Die Bewertung erfolgt dabei zeitlich aufgelöst in Jahresschritten. Abbildung 7.1 gibt einen Überblick über die Bewertung der Hauptantriebsstrangkomponenten hinsichtlich der verwendeten bzw. benötigten Fertigungstechnologien.

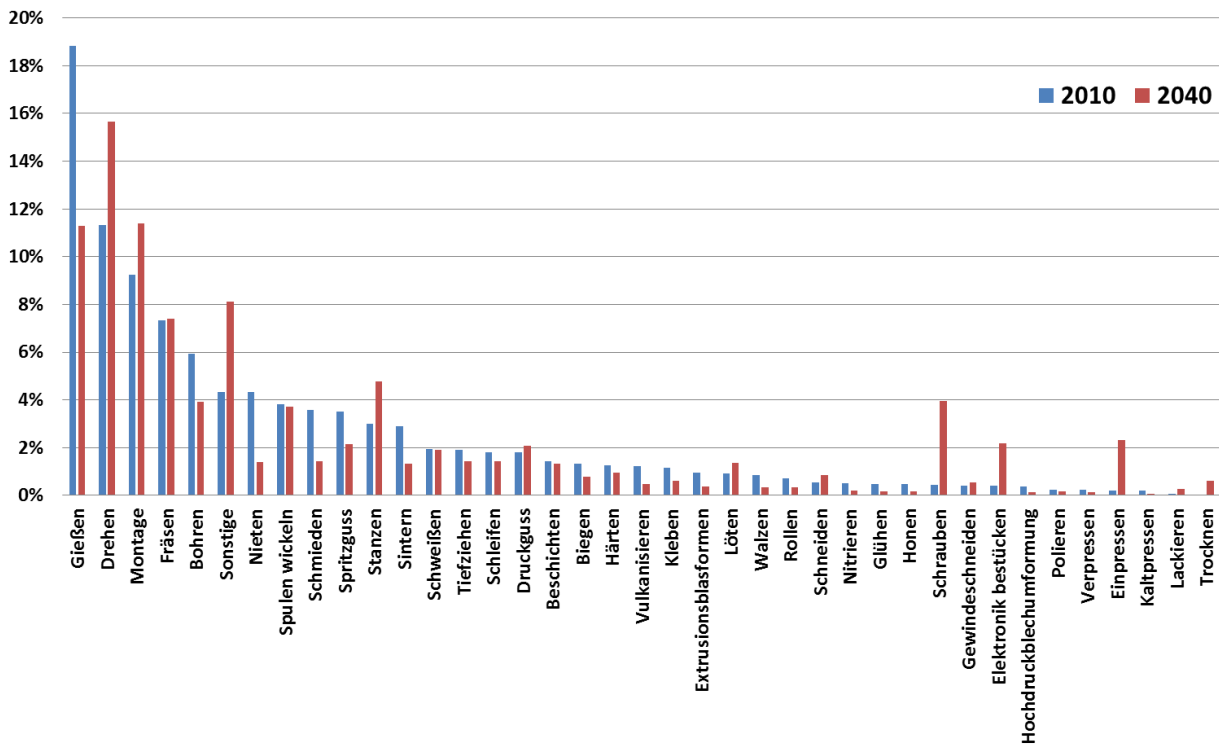
---

<sup>11</sup> Eine vollständige Auflistung der betrachteten Fertigungstechnologien befindet sich wie zuvor erwähnt im Anhang.



### 7.4.1.1 Entwicklung der Fertigungstechnologien im Basisszenario

Betrachtet man im Basisszenario den Anteil der jeweiligen Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung bezogen auf die Hauptantriebsstrangskomponenten Verbrennungsmotor, Elektromaschine, Leistungselektronik, Traktionsbatterie, Brennstoffzelle sowie Getriebe, so wird, dass im Betrachtungszeitraum bis 2040 deutliche Veränderungen eintreten werden. Hierbei lässt sich allerdings kein verallgemeinerbarer Trend erkennen. Vielmehr wird deutlich, dass sich sowohl die Rangfolge der Relevanz der Technologien als auch die relative Gewichtung bzw. der Anteil an der Wertschöpfung verschieben werden. Abbildung 7.2 gibt einen grafischen Überblick über die Anteile der wichtigsten Fertigungstechnologien für die Stützjahre 2010 und 2040. Die Technologien sind hierbei in absteigender Reihenfolge nach ihrem Anteil in 2010 dargestellt.

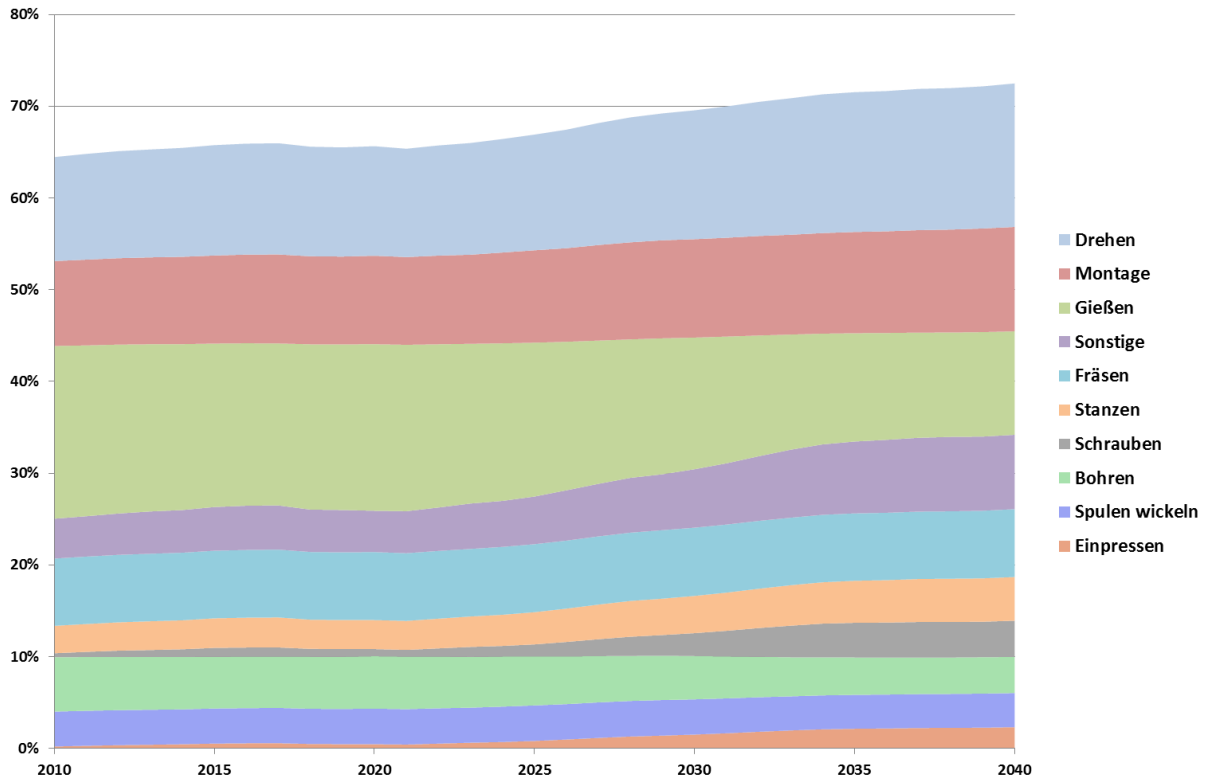


**Abbildung 7.2: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung des Antriebsstrangs im Basisszenario in den Stützjahren 2010 und 2040.**

Quelle: DLR.

Zu erkennen ist eine Dreiteilung der Fertigungstechnologien hinsichtlich ihrer zeitlichen Entwicklung. Zum einen werden Technologien, welche heute einen hohen Anteil an der Wertschöpfung haben, zukünftig einen geringeren Stellenwert einnehmen. Zu dieser ersten Gruppe zählen vor allem klassische Fertigungstechnologien wie beispielsweise Gießen, Bohren, Nieten und Schmieden. Zum anderen werden Technologien, welche zum heutigen Zeitpunkt eine untergeordnete Rolle spielen bzw. die bisher noch nahezu nicht eingesetzt werden bis zum Jahr 2040 an Bedeutung gewinnen. Zu dieser zweiten Gruppe zählen sowohl klassische Prozesse wie Drehen, Stanzen und Schrauben als auch neu hinzu kommende Prozesse wie das Bestücken von Elektronik, Einpressen und Trocknen. Eine dritte Gruppe bilden Fertigungstechnologien,

welche in ihrem Wertschöpfungsanteil annähernd konstant bleiben. Hierzu zählen beispielsweise Fräsen, Schweißen und Tiefziehen. Abbildung 7.3 stellt die zeitliche Entwicklung der betrachteten Fertigungstechnologien dar.



**Abbildung 7.3: Anteil der 10 relevantesten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung im Basisszenario.**

Quelle: DLR.

Betrachtet man die Größenordnungen der Relevanz der Wertschöpfungsanteile, so fällt auf, dass vor allem einige ausgewählte Fertigungstechnologien, welche bisher nur eine untergeordnete Rolle spielen, ihren Anteil teilweise signifikant erhöhen werden. Die prozentual größte Veränderung lässt sich hierbei beim Vergießen beobachten. Der Wertschöpfungsanteil steigt hier ausgehend von einem nahezu nicht vorhandenen Niveau um das 42-Fache an. Weitere nennenswerte Technologien, welche ihre Wertschöpfungsanteile signifikant steigern werden, sind Ätzen, Eindrücken, Wuchten sowie Trocknen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass alle zuvor genannten Prozesse von einem sehr niedrigen Niveau in 2010 starten und in Summe weniger als ein Promille der gesamten Wertschöpfung des Antriebsstrangs darstellen. Der Hauptgrund für diese deutliche Zunahme der Relevanz ist, dass diese Fertigungstechnologien für neuartige Komponenten wie Elektromaschinen, Traktionsbatterien und Leistungselektronik benötigt werden und daher erst im Laufe der Marktdurchdringung von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten an Bedeutung gewinnen. Für Industrie und Forschung bedeutet dies, dass eine frühzeitige Weichenstellung hinsichtlich der Qualifikation von Personal für diese Fertigungstechnologien, aber auch ein rechtzeitiger Aufbau von Produktionskapazitäten notwendig ist.

Darüber hinaus fällt auf, dass es bei den drei Fertigungstechnologien mit den größten Wertschöpfungsanteilen im Ausgangsjahr nämlich Gießen, Drehen und Montage zwar zu einer Umverteilung der Rangfolge bis 2040 kommt, diese drei Prozesse jedoch auch am Ende des Betrachtungshorizonts weiterhin die drei mit



den größten Wertschöpfungsanteilen sein werden. Fräsen – in 2010 die Fertigungstechnologie mit dem viertgrößten Wertschöpfungsanteil – hat während des gesamten Zeitraums einen nahezu konstanten Wertschöpfungsanteil von etwa 7%. Die beiden Hauptgründe für die insgesamt stabile Entwicklung dieser vier bedeutsamsten Fertigungstechnologien liegen zum einen in ihrem hohen Anteil an der Wertschöpfung von konventionellen Verbrennungsmotoren, welche im gesamten Betrachtungszeitraum auch weiterhin verbaut werden, und zum anderen in ihrer Bedeutung auch für neuartige Komponenten wie Elektromaschinen oder Leistungselektronik. In der absoluten Größenordnung fällt dabei auf, dass Gießen aufgrund seiner großen Bedeutung bei der Herstellung konventioneller Verbrennungsmotoren einen nahezu konstanten Verlauf über den Betrachtungszeitraum aufweist. Die Abnahme des relativen Wertschöpfungsanteils liegt darin begründet, dass im Laufe des Betrachtungszeitraums vermehrt neuartige Komponenten in den Fahrzeugen verbaut werden und damit das Marktvolumen steigt. Trotz oder gerade aufgrund der Abnahme der konventionellen Prozesse ist es für Industrie und Forschung essentiell, die Effizienz dieser Fertigungstechnologien auch weiterhin zu steigern.

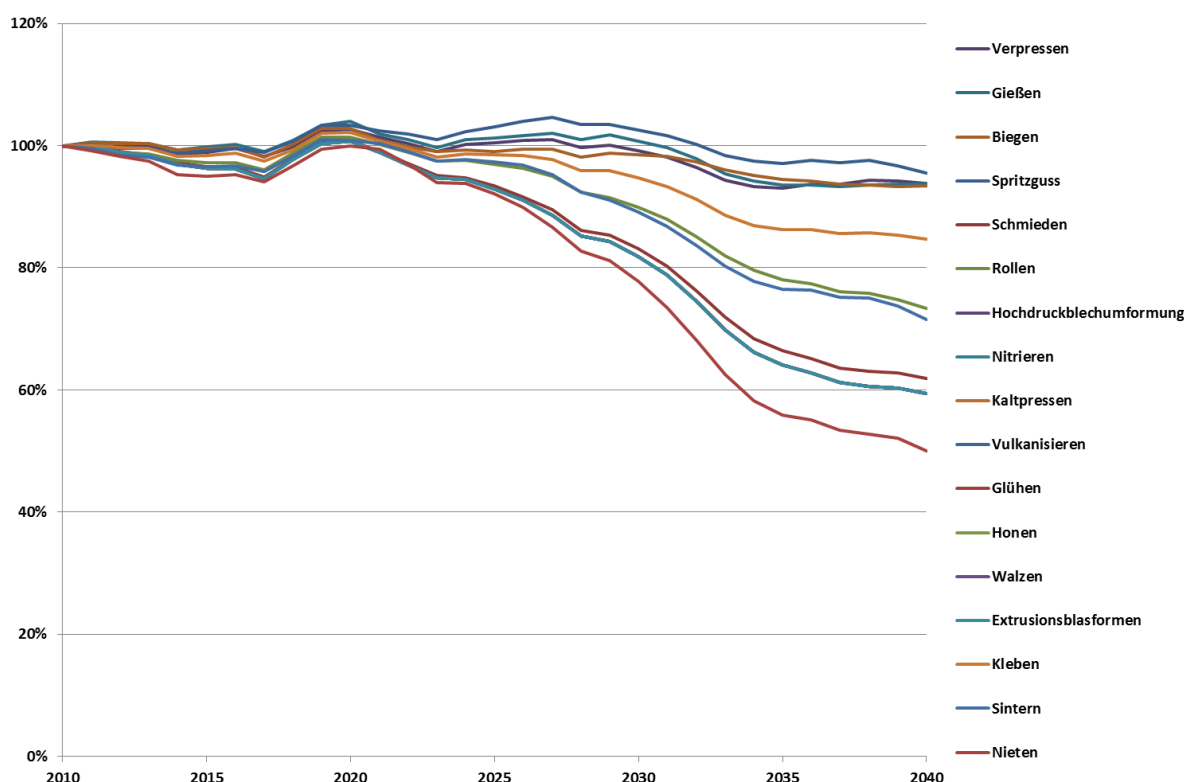


Abbildung 7.4: Fertigungstechnologien mit abnehmenden Anteilen an der Wertschöpfung (2010: 100%).

Quelle: DLR.

Beschränkt man die Analyse der Relevanz der Fertigungstechnologien auf die Prozesse, welche im Betrachtungszeitraum an Bedeutung verlieren, so fällt auf, dass keine der Technologien bis 2040 unter 50% ihres Ausgangswertes fällt. Am stärksten von der Elektrifizierung des Antriebsstrangs betroffen sind die Technologien Nieten, Sintern, Kleben, Extrusionsblasformen, Walzen, Honen und Glühen, wobei Nieten mit einer Reduktion auf 50% des Ausgangswertes am stärksten betroffen ist. Diese Abnahme ist bei allen Technologien sowohl im relativen Wertschöpfungsanteil als auch in der absoluten Wertschöpfung zu beobachten. Hauptgrund für die Abnahme der Wertschöpfungsanteile ist der Bedarf dieser Fertigungstechnologien für

konventionelle Antriebsstrangkomponenten wie Verbrennungsmotoren und Getriebe. Hier gilt es zukünftig, die Wettbewerbsfähigkeit der Technologien sowie des gesamten Industriezweiges zu sichern. Für Industrie und Forschung bedeutet dies, dass die Effizienz auch weiterhin gesteigert werden und darüber hinaus die Erschließung weiterer Geschäftsfelder geprüft werden muss.

### 7.4.1.2 Entwicklung der Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Relevanzanalyse des Basisszenarios mit den korrespondierenden Ergebnissen der beiden Alternativszenarien verglichen. Die so identifizierten Veränderungen und Sensitivitäten lassen sich abschließend im Sinne einer Plausibilitätsprüfung bewerten.

Wie in Abschnitt 6.3.2 erläutert, dient das erste Alternativszenario zur Ableitung von Auswirkungen, welche eine elektromobile Zukunft mit einem sehr hohen Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge auf die Relevanz zukünftiger Fertigungstechnologien hat. Hierzu werden, wie im Basisszenario (vgl. Kapitel 6.3.1) bereits erläutert, die Ergebnisse der Strukturanalyse und der Szenariorechnungen kombiniert.

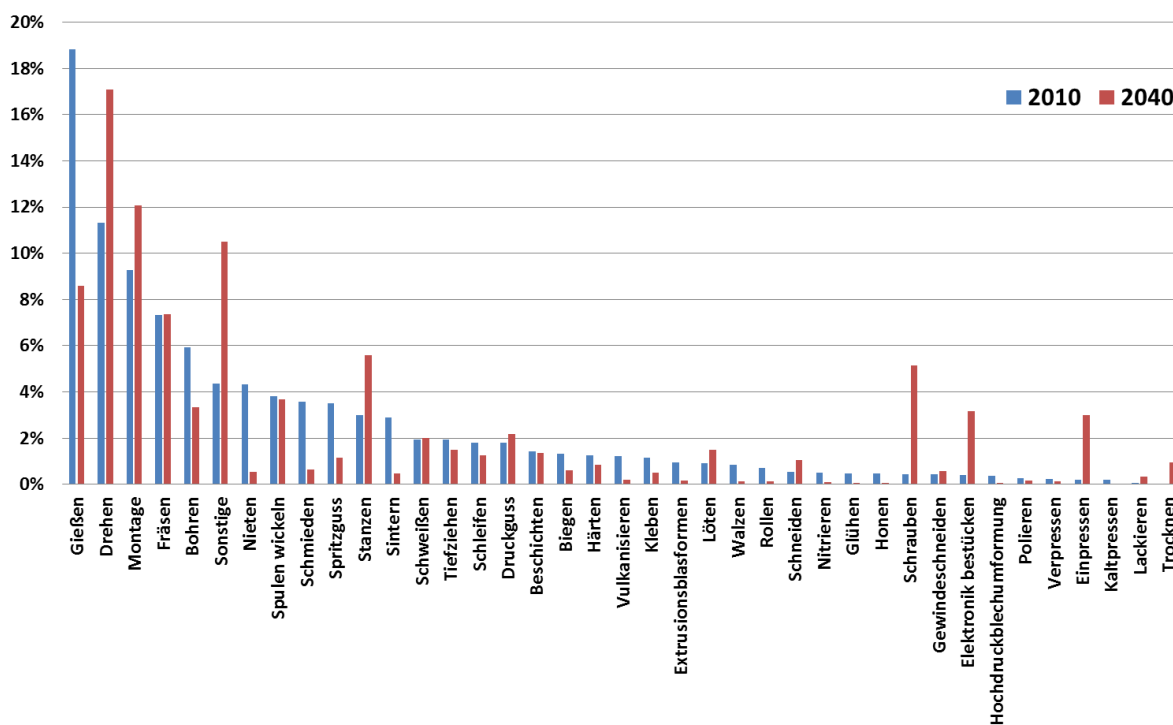


Abbildung 7.5: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario in den Stützjahren 2010 und 2040 (sortiert nach Relevanz in 2010).

Quelle: DLR.

Abbildung 7.5 stellt die Veränderung der Relevanz der Fertigungstechnologien im Anfangs- und Endjahr dar. Zu erkennen ist, dass die gleichen Veränderungen wie bereits im Basisszenario eintreten, jedoch deutlich stärker ausgeprägt. Konkret bedeutet dies, dass die Fertigungstechnologien, welche im Basisszenario an Bedeutung gewinnen bzw. verlieren, dies auch im ersten Alternativszenario tun, jedoch mit einer größe-

ren Veränderung. Darüber hinaus zeigt die Gruppe der sich konstant entwickelnden Fertigungstechnologien in beiden Szenarien das gleiche Verhalten.

Für die drei Fertigungstechnologien mit der größten Relevanz bedeuten diese Veränderungen, dass sich die Rangfolge der Relevanz analog zum Basisszenario verändert. Hierbei verzeichnet Gießen den größten Rückgang, wohingegen Drehen die deutlichste Zunahme aufweist. Bemerkenswert an der Entwicklung von Gießen ist, dass der Rückgang erst zu einem späteren Zeitpunkt ab dem Jahr 2030 einsetzt. Dies liegt vor allem darin begründet, dass erst zu diesem Zeitpunkt Fahrzeuge, die noch einen Verbrennungsmotor in den Antriebsstrang integriert haben, durch die vollelektrischen Batteriefahrzeuge ersetzt werden.

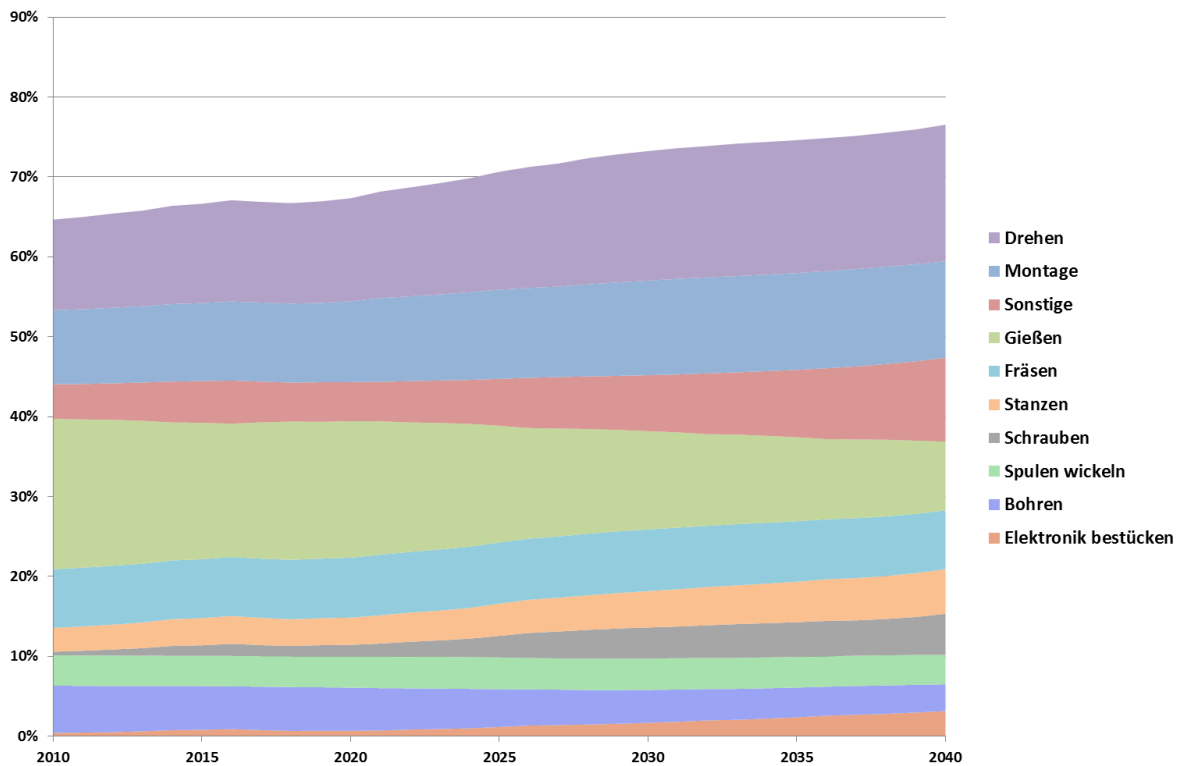
Im direkten Vergleich der beiden Szenarien bedeutet diese Entwicklung jedoch, dass eine deutliche Veränderung in der Fahrzeugflotte hin zu mehr batterieelektrischen Fahrzeugen keine signifikanten Unterschiede in der Entwicklung für die Fertigungstechnologien mit der größten Relevanz im Ausgangsjahr zur Folge hat. Dennoch ist zu bemerken, dass die Veränderungen schneller und deutlich ausgeprägter verlaufen als im Basisszenario, wobei auch hier zunächst eine relativ konstante Entwicklung bis 2020 zu beobachten ist.

Neben den Fertigungstechnologien mit den größten Anteilen an der Wertschöpfung im Ausgangsjahr zählen, wie bereits im Basisszenario, klassische Bearbeitungsprozesse wie Schmieden, Nieten und Sintern zu der Gruppe der Technologien, welche den größten Rückgang der Relevanz zu verzeichnen haben. Auch hier bestätigt sich also die Beobachtung, dass die Richtung der Veränderung sich analog zu der des Basisszenarios verhält, die Stärke der Veränderung jedoch zunimmt.

Bemerkenswert ist, dass der Prozess Fräsen wie bereits im Basisszenario eine konstante Entwicklung vollzieht und somit gänzlich unelastisch auf die veränderte Zusammensetzung der Neufahrzeugflotte reagiert.

Zu den Fertigungstechnologien, welche ihre Relevanz deutlich steigern können, zählen wie bereits im Basisszenario das Bestücken mit Elektronik, Einpressen und Trocknen. Hierbei liegt der Hauptgrund darin, dass die höhere Durchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge eine häufigere Nutzung dieser Fertigungstechnologien bedingt. Der Wandel des Neufahrzeugmarktes hin zu einer höheren Durchdringung batterieelektrischer Fahrzeuge stellt also für Industrie und Forschung keine neuen Herausforderungen dar, beschleunigt den Wandel aber deutlich. Abbildung 7.6 fasst die zeitliche Entwicklung der Relevanz der Fertigungstechnologien grafisch zusammen.

Betrachtet man die relativen Unterschiede in der Entwicklung der Relevanz der Fertigungstechnologien zwischen dem Basisszenario und dem ersten Alternativszenario, so wird deutlich, dass die größten Veränderungen bei Fertigungstechnologien zu beobachten sind, welche zum einen hauptsächlich bei neuartigen Komponenten Anwendung finden und zum anderen von einer geringen Relevanz im Ausgangsjahr starten. Diese Entwicklung ist intuitiv begründbar und überrascht nicht. Dennoch ist die Höhe der Veränderung bemerkenswert und lässt sich als Sensitivität des Alternativszenarios interpretieren. So kann das Trocknen, welches ein wesentlicher Prozessschritt der Batterieherstellung ist, seinen relativen Anteil an der Wertschöpfung um weitere zwei Drittel im Vergleich zum Basisszenario steigern. Diese Veränderung lässt sich hauptsächlich durch den durch Batteriefahrzeuge verursachten Mehrbedarf an Traktionsbatterien begründen. Diese Detailbetrachtung macht deutlich, dass es für einzelne Technologien durchaus ausschlaggebend sein kann, welche Anzahl an vollelektrischen Fahrzeugen in den Markt eintritt. Insbesondere die für die Herstellung von neuartigen Komponenten notwendigen Technologien wie Trocknen, das Bestücken mit Elektronik, Schneiden, Ätzen, Wuchten, Vergießen, Schrauben sowie Eindrücken und Einpressen verzeichnen eine deutliche Zunahme an Bedeutung. Für all diese Technologien ist die Steigerung vom Basisszenario hin zum ersten Alternativszenario signifikant und liegt zwischen 30% (Einpressen) und 63% (Trocknen). Dies impliziert für Industrie und Forschung die Notwendigkeit, sich an neue Anforderungen anzupassen. Die Qualifikation des Personals sowie die Fertigungskapazitäten müssen der Marktentwicklung folgen und eine ausreichende Flexibilität aufweisen, um gegebenenfalls auf die beschleunigte Veränderung des Marktes reagieren zu können.



**Abbildung 7.6: Anteil der 10 wichtigsten Fertigungstechnologien an der Wertschöpfung im ersten Alternativszenario.**

Quelle: DLR.

Neben den Technologien, die eine deutliche Zunahme der Relevanz zu verzeichnen haben, gibt es aber auch Prozesse, welche eine signifikante Abnahme der Relevanz aufweisen. Hierzu zählen Fertigungstechnologien wie Nieten, Rollen oder Walzen, welche insbesondere bei der Herstellung von Verbrennungsmotoren zur Anwendung kommen. Durch die Substitution eines Großteils der hybridisierten Fahrzeuge durch voll-elektrische Fahrzeuge in diesem ersten Alternativszenario und dem damit verbundenen geringeren Bedarf an Verbrennungsmotoren lässt sich diese signifikante Abnahme der Relevanz begründen. Im Fall von Nieten beträgt die Abnahme 60% im Vergleich zum Basisszenario. Insbesondere im langfristigen Ausblick bis 2040 ist diese Entwicklung für das weitere Handeln von Industrie und Forschung von Bedeutung. Abbildung 7.7 stellt die prozentualen Veränderungen grafisch gegenüber. Hierbei beziehen sich die angegebenen Werte auf die prozentuale Veränderung zwischen dem Basisszenario und dem ersten Alternativszenario bis 2040. Die Höhe der Balken gibt an, welche Veränderung die betrachteten Prozesse im Alternativszenario im Vergleich zur Entwicklung des Basisszenarios durchlaufen.

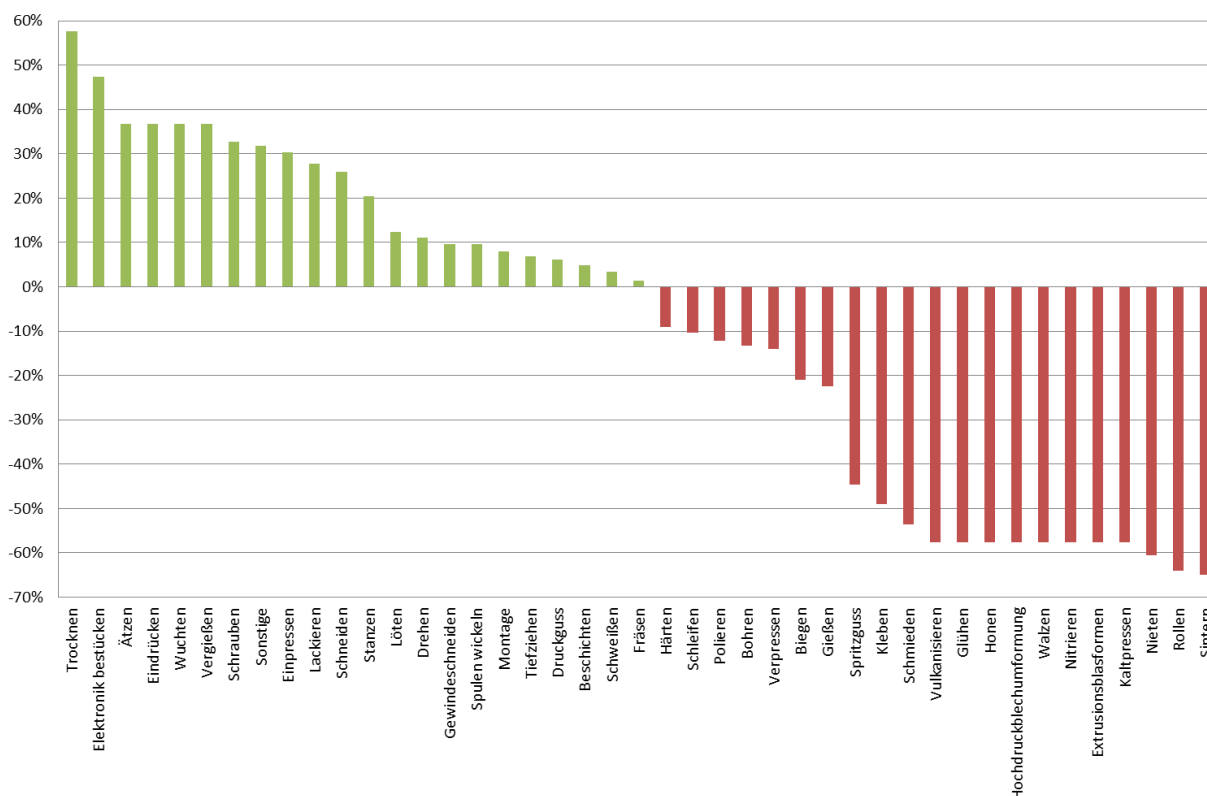


Abbildung 7.7: Prozentuale Veränderung der Relevanz der Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario im Vergleich zum Basisszenario in 2040.

Quelle: DLR.

### 7.4.1.3 Entwicklung der Fertigungstechnologien im zweiten Alternativszenario

Das zweite Alternativszenario konzentriert sich im Vergleich zum ersten Alternativszenario nicht auf den erhöhten Marktanteil eines Antriebsstrangs, sondern antizipiert vielmehr Randbedingungen, welche einen schnelleren Wandel hin zu einer höheren Durchdringung elektrifizierter Antriebskonzepte im Vergleich zum Basisszenario ermöglichen (vgl. Abschnitt 6.3.3). Hieraus sollen im Folgenden analog zum bisherigen Vorgehen Konsequenzen für die Relevanz und die Entwicklung von Fertigungstechnologien gezogen werden.

Abbildung 7.8 stellt analog zur Analyse in den ersten beiden Szenarien die Relevanz der unterschiedlichen Fertigungstechnologien im Ausgangs- sowie im Endjahr für das zweite Alternativszenario dar. Auch hier lassen sich ähnliche Veränderungen wie bereits im ersten Alternativszenario erkennen. Im Ausgangsjahr relevante Prozesse verlieren an Bedeutung. Gleichzeitig gewinnen Fertigungstechnologien, welche zur Herstellung innovativer Antriebsstrangkomponenten verwendet werden, an Relevanz. Diese Beobachtung entspricht dem erwarteten Ergebnis. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Rangfolge der Relevanz der im Ausgangsjahr wichtigsten Prozesse trotz der beschleunigten Marktumschichtung hin zu elektrifizierten Fahrzeugkonzepten in allen drei Szenarien gleich bleibt. Die veränderten Marktgegebenheiten haben also keine gänzlich unterschiedlichen Entwicklungen im Hinblick auf die relevantesten Technologien zur Folge. Für Industrie und Forschung bedeutet dies, dass sich das zukünftige Handeln bei allen gegebenen und nach wie vor existierenden Unsicherheiten bis zu einem bestimmten Grad planen lässt.

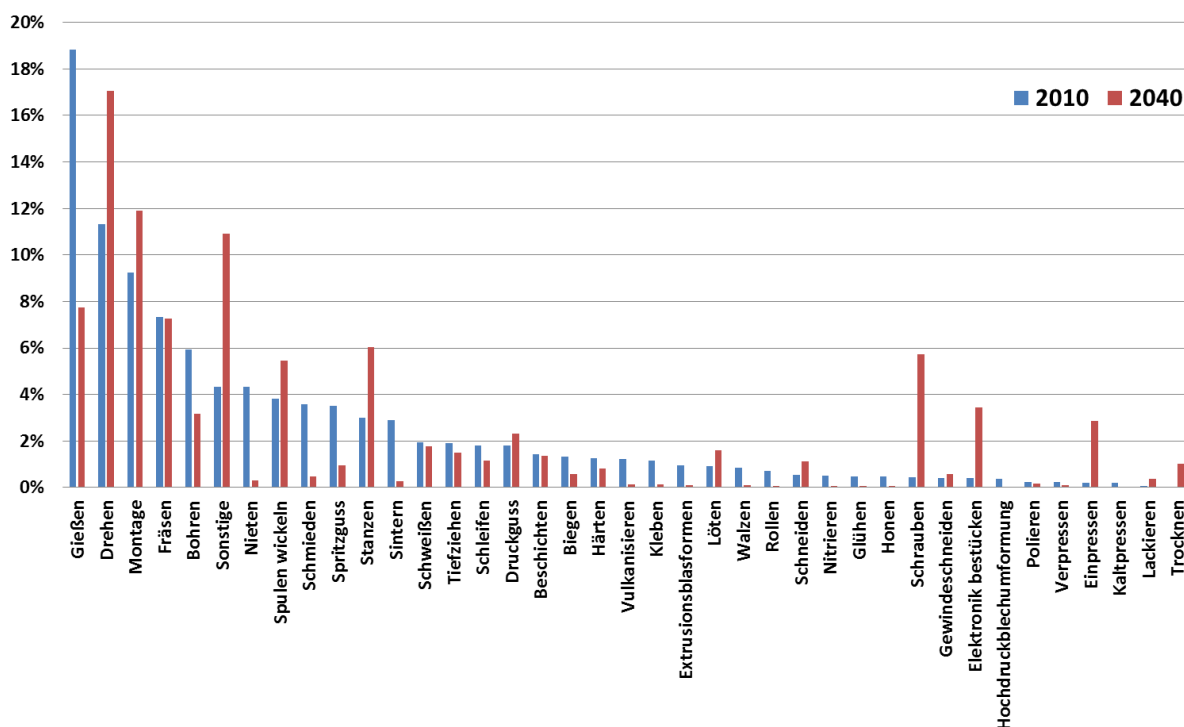
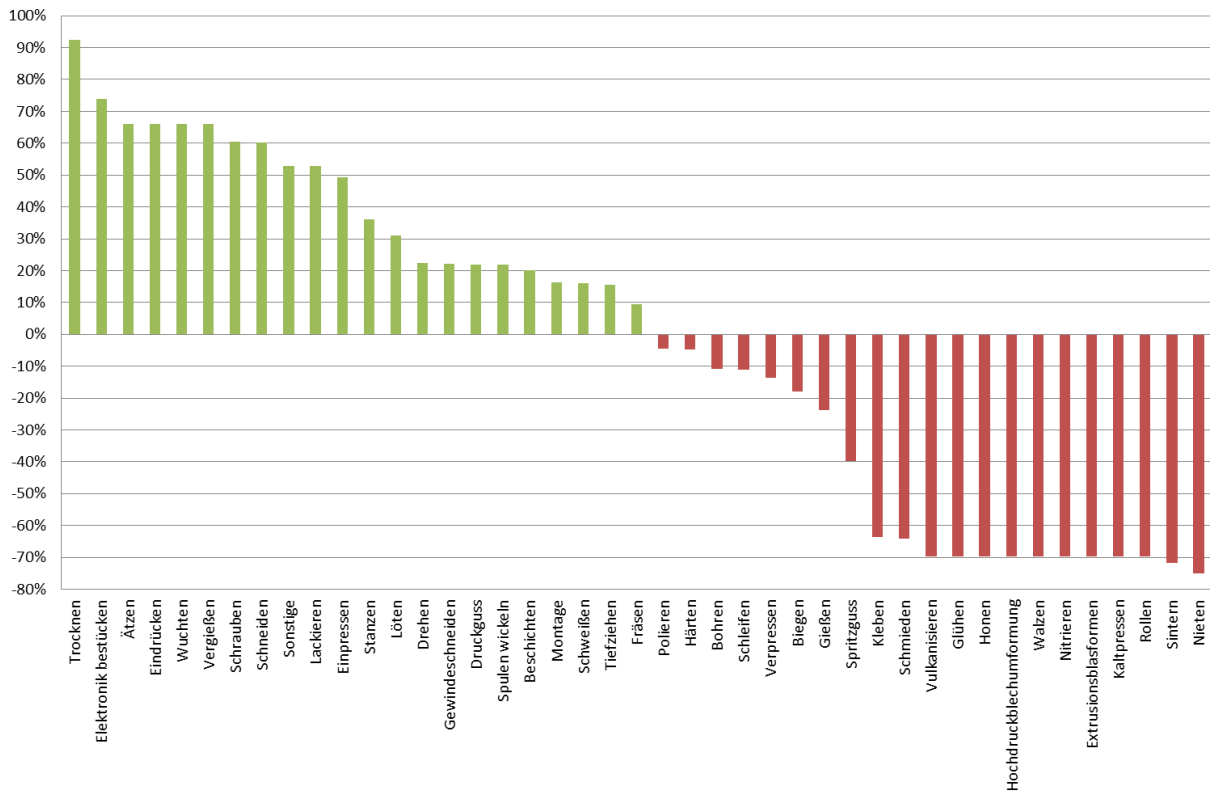


Abbildung 7.8: Anteil der wichtigsten Fertigungstechnologien im zweiten Alternativszenario in den Stützjahren 2010 und 2040 (sortiert nach Relevanz in 2010).

Quelle: DLR.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass sich die Bedeutung des Fräsens, wie bereits in den ersten beiden Szenarien, nahezu konstant entwickelt. Die Relevanz dieser Technologie reagiert also – wie bereits zuvor vermutet – unelastisch auf den sich verändernden Markt.

Entscheidend für die Analyse, inwiefern eine schnellere Entwicklung hin zu einer elektrifizierten Fahrzeugflotte Auswirkungen auf die Relevanz von Fertigungstechnologien hat, ist demnach, in welchem Maße sich die Bedeutung der Technologien verändert. Vergleicht man die prozentuale Veränderung zwischen der Relevanz der Prozesse im Basisszenario und im zweiten Alternativszenario, so fällt auf, dass die Höhe der Veränderung deutlich über den Veränderungen im ersten Alternativszenario liegt. Der Prozess des Trocknens erfährt eine Steigerung der Relevanz von über 90%, also nahezu eine Verdopplung der Bedeutung im Vergleich zu der Entwicklung im Basisszenario. Darüber hinaus nimmt die Bedeutung der Prozesse, welche zur Herstellung von neuartigen Komponenten verwendet werden, signifikant zu. Diese Technologien reagieren also keineswegs unelastisch auf die veränderten Marktbedingungen, sondern werden signifikant durch sie beeinflusst. Um auf die zukünftigen Entwicklungen reagieren zu können und rechtzeitig die notwendigen Schritte einleiten zu können, ist es für Industrie und Forschung also von entscheidender Bedeutung, den Markt und seine Entwicklung detailliert zu analysieren.



**Abbildung 7.9: Prozentuale Veränderung der Relevanz der Fertigungstechnologien im zweiten Alternativszenario im Vergleich zum Basisszenario in 2040.**

Quelle: DLR.

Im Vergleich der beiden Alternativszenarien untereinander wird deutlich, dass insbesondere die Fertigungstechnologien, welche zur Herstellung von elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten genutzt werden, deutlich an Bedeutung gewinnen, und gleichzeitig Fertigungstechnologien, welche konventionellen Komponenten zuschreiben sind, stärker an Bedeutung verlieren. Die Art der elektrifizierten Antriebsstränge hat also einen wesentlichen Einfluss auf die Relevanz der Fertigungstechnologien. Die Aussage einer elektromobilen Zukunft allein reicht daher nicht aus, um Rückschlüsse auf die Entwicklung der Relevanz von Fertigungstechnologien treffen zu können. Vielmehr ist es erforderlich, die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte und damit die verwendeten Komponenten in den jeweiligen Antriebssträngen detailliert zu analysieren. In den beiden hier analysierten Szenarien zeigt sich, dass ein Wandel der Neufahrzeugflotte mit einer Fokussierung auf batterieelektrische Antriebsstränge einen deutlich geringeren Einfluss auf die Entwicklung der Relevanz von Fertigungstechnologien hat als die Umschichtung des Neufahrzeugmarktes hin zu einem diversifizierten Antriebsstrangportfolio.<sup>12</sup> Abbildung 7.10 stellt die prozentualen Veränderungen im zweiten Alternativszenario im Vergleich zum ersten Alternativszenario grafisch dar.

<sup>12</sup> Vgl. zu den Fahrzeugszenarien Kapitel 6.



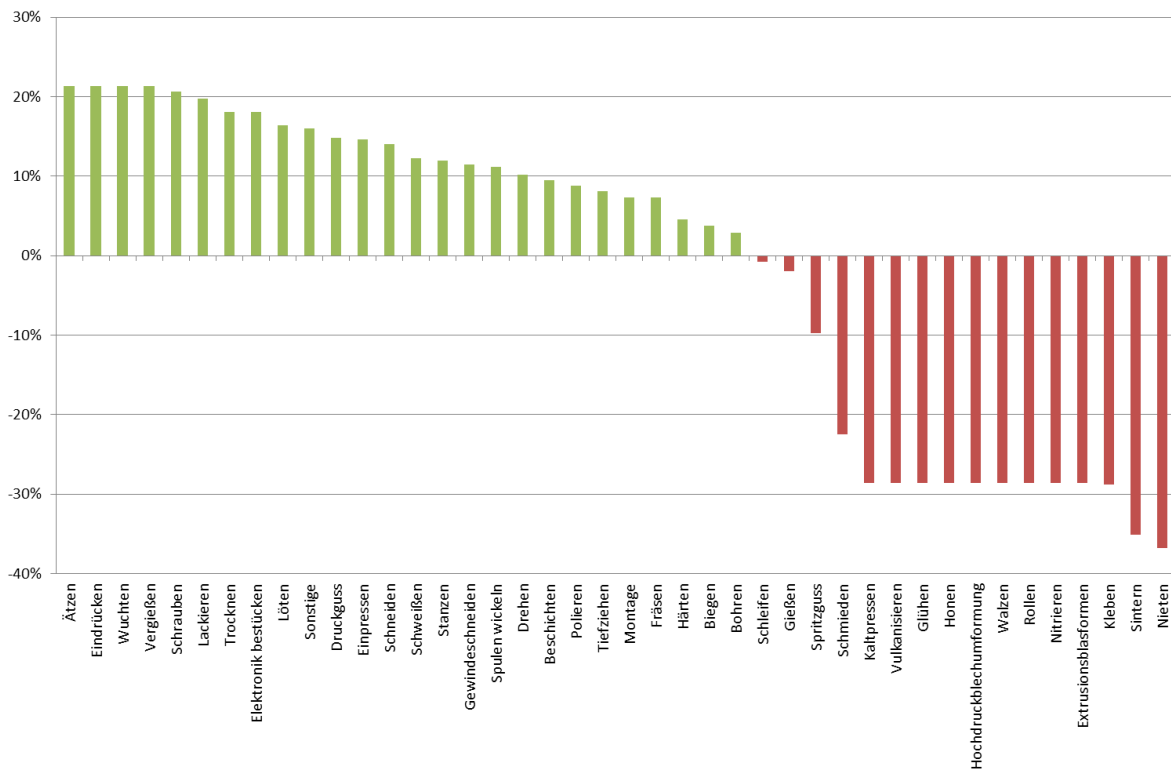


Abbildung 7.10: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Fertigungstechnologien des zweiten Alternativszenarios im Vergleich zum ersten Alternativszenario in 2040.

Quelle: DLR.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich die Relevanz der unterschiedlichen Fertigungstechnologien in allen drei Szenarien in die gleiche Richtung entwickelt, die absolute Höhe der Veränderung jedoch stark vom jeweiligen Szenario selbst abhängt. So nimmt in allen drei Szenarien die Bedeutung von klassischen Verarbeitungsprozessen wie Gießen, Bohren, Nieten, Spritzguss oder Schmieden ab. Je höher die Marktdurchdringung elektrifizierter Fahrzeuge ist, desto größer ist die Abnahme der Relevanz dieser Prozesse. Fertigungsprozesse, welche hauptsächlich für die Herstellung neuartiger Antriebsstrangkomponenten verwendet werden, können in allen drei Szenarien ihre Relevanz steigern. Zu Prozessen dieser Gruppe zählen das Drehen, das Wickeln von Spulen, das Stanzen sowie bisher nahezu nicht verwendete Prozesse wie das Bestücken mit Elektronik oder das Einpressen. Bemerkenswert ist, dass es darüber hinaus Fertigungstechnologien gibt, welche nahezu unberührt von der Entwicklung des Fahrzeugmarktes bleiben. Hierzu zählen beispielsweise Fräsen, Schweißen sowie Tiefziehen.

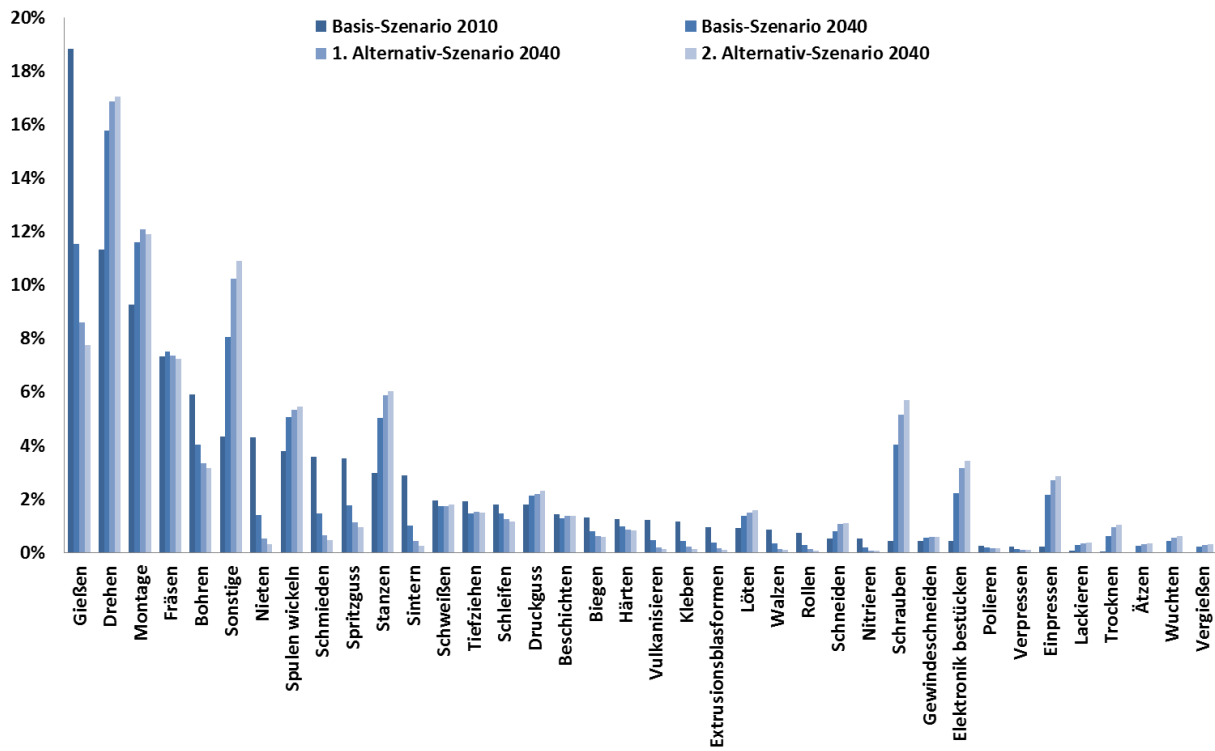


Abbildung 7.11: Überblick über die Entwicklung der Relevanz der Fertigungstechnologien in allen drei Fahrzeugszenarien.

Quelle: DLR.

### 7.4.2 Werkstoffe

Analog zur Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Fertigungstechnologien sollen im Folgenden die in den Antriebsstrangkomponenten verwendeten Werkstoffe analysiert werden. Hierbei werden die Ergebnisse der Detailanalysen, wie in der Methodik in Abschnitt 7.1 erläutert, mit den Resultaten der Fahrzeugsznarien kombiniert und ausgewertet. Abbildung 7.12 gibt einen grafischen Überblick über die Bewertung der Hauptantriebsstrangkomponenten hinsichtlich der verbauten Werkstoffe.

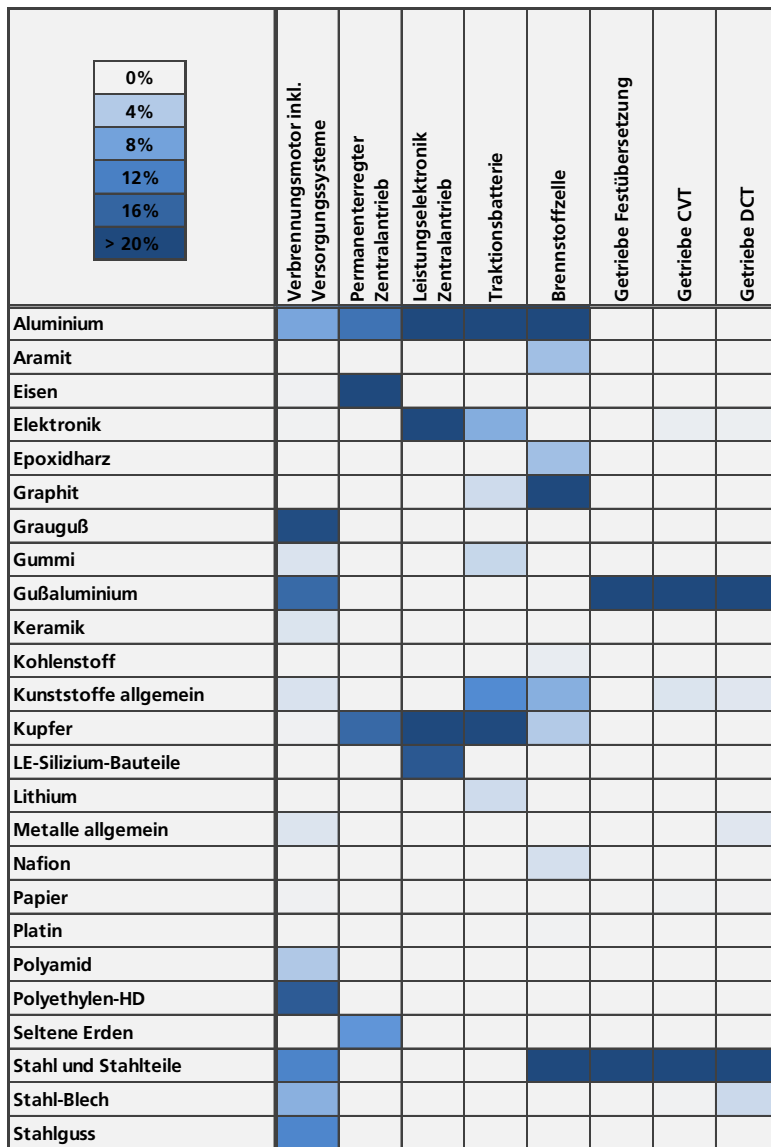
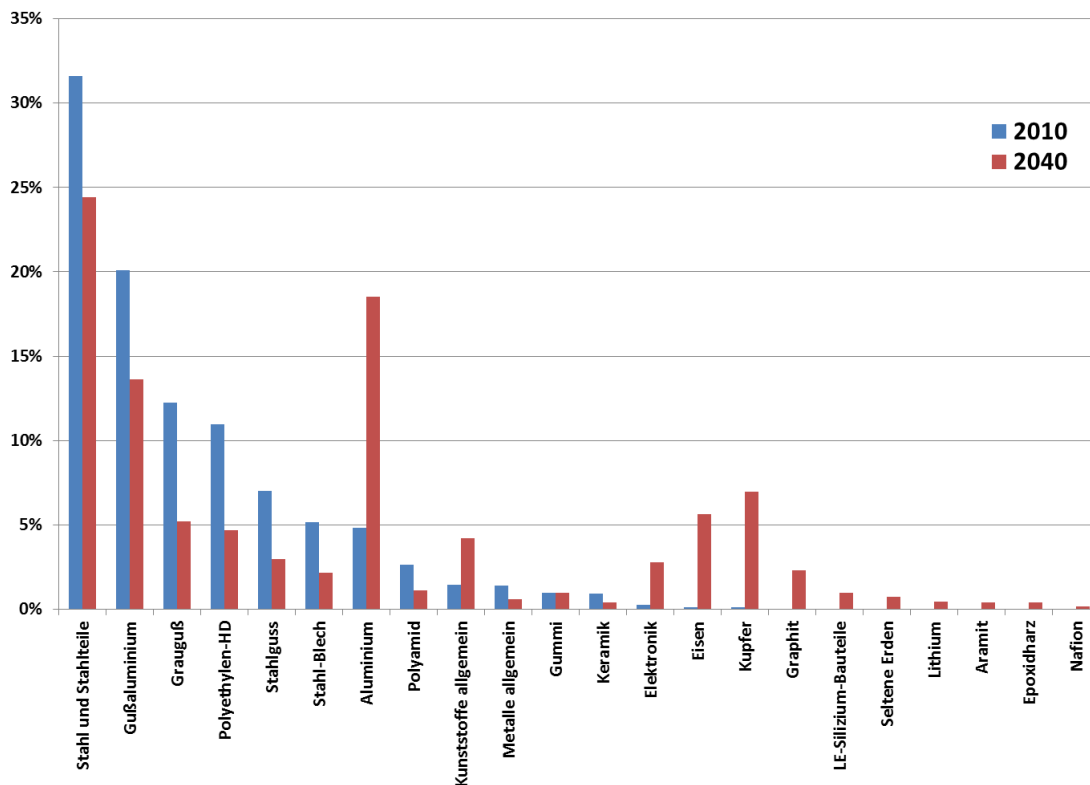


Abbildung 7.12: Bewertungsmatrix der Hauptantriebsstrangkomponenten hinsichtlich der Werkstoffe. Prozentwerte geben den Anteil des Werkstoffs an der Masse der Antriebsstrangkomponente an. Quelle: DLR.

### 7.4.2.1 Entwicklung der Werkstoffe im Basisszenario

In der zeitlichen Entwicklung der Werkstoffe lässt sich im Gegensatz zu den Fertigungstechnologien im Basisszenario keine Drei-, sondern vielmehr eine Zweiteilung beobachten. Die Relevanz von Werkstoffen nimmt im Betrachtungszeitraum entweder zu oder ab, eine Gruppe von sich konstant über die Zeit entwickelnden Werkstoffe existiert nicht. Abbildung 7.13 gibt einen Überblick über die Relevanz der wichtigsten Werkstoffe in den beiden Stützjahren 2010 und 2040.



**Abbildung 7.13: Relevanz der Werkstoffe im Antriebsstrang in den Stützjahren 2010 und 2040 im Basisszenario.**

Quelle: DLR.

In der zeitlichen Entwicklung der Relevanz ist, ähnlich wie im Fall der Fertigungstechnologien, zu erkennen, dass Werkstoffe, welche zum Ausgangszeitpunkt bereits eine hohe Relevanz besitzen, diese auch zum Ende des Analysezeitraums aufweisen. Auffällig ist dabei, dass die sechs Werkstoffe mit der größten Relevanz Stahl, Gussaluminium, Grauguß, Polyethylen-HD, Stahlguss sowie Stahlblech an Bedeutung verlieren werden. Diese Entwicklung liegt hauptsächlich in der Verwendung dieser Materialien in konventionellen Verbrennungsmotoren sowie Getrieben begründet. Mit abnehmender Stückzahl der verbauten Verbrennungsmotoren sinkt auch der Bedarf und damit die Relevanz dieser Werkstoffe. Für Industrie und Forschung bedeutet dies, dass die bisherige Industrielandschaft einem Wandel unterliegt, auf den adäquat und vor allem rechtzeitig reagiert werden muss.

Betrachtet man die Werkstoffe mit der größten Steigerung der Relevanz, so wird deutlich, dass die vier am stärksten anwachsenden Materialien Aluminium, Kunststoff, Kupfer und Eisen zum Ausgangszeitpunkt nur

eine untergeordnete Bedeutung hinsichtlich des Antriebsstrangs haben. An dieser Stelle sei erneut darauf hingewiesen, dass sich diese quantitative Analyse auf die Hauptkomponenten des Antriebsstrangs konzentriert und Veränderungen bzw. Materialwechsel in der Fahrzeugstruktur nicht berücksichtigt. Trotz der untergeordneten Rolle zu Beginn des Betrachtungszeitraums wird Aluminium jedoch bis 2040 signifikant an Bedeutung gewinnen und letztlich das zweitwichtigste Material im Antriebsstrang werden. Insbesondere der hohe Anteil dieses Metalls an neuartigen Komponenten wie Elektromaschinen, Traktionsbatterien und Brennstoffzellen trägt zu dieser überdurchschnittlichen Steigerung der Relevanz bei. Ähnlich stellt sich die Situation bei den beiden anderen Metallen Kupfer und Eisen dar, wobei hier hauptsächlich die Verwendung in Elektromaschinen als Treiber für die Steigerung der Relevanz dient.

Unter den Werkstoffen mit der größten relativen Steigerung der Relevanz befinden sich zudem drei weitere Werkstoffe, welche im Ausgangsjahr nahezu keinen Einfluss haben: Elektronikbauteile inklusive der Untergruppe der Silizium-Bauteile sowie Graphit. Die wesentlichen Treiber für die signifikante Zunahme der Relevanz dieser Bauteile bzw. Materialien liegt in der deutlichen Steigerung der Verwendung von Leistungselektronikkomponenten und Traktionsbatterien.

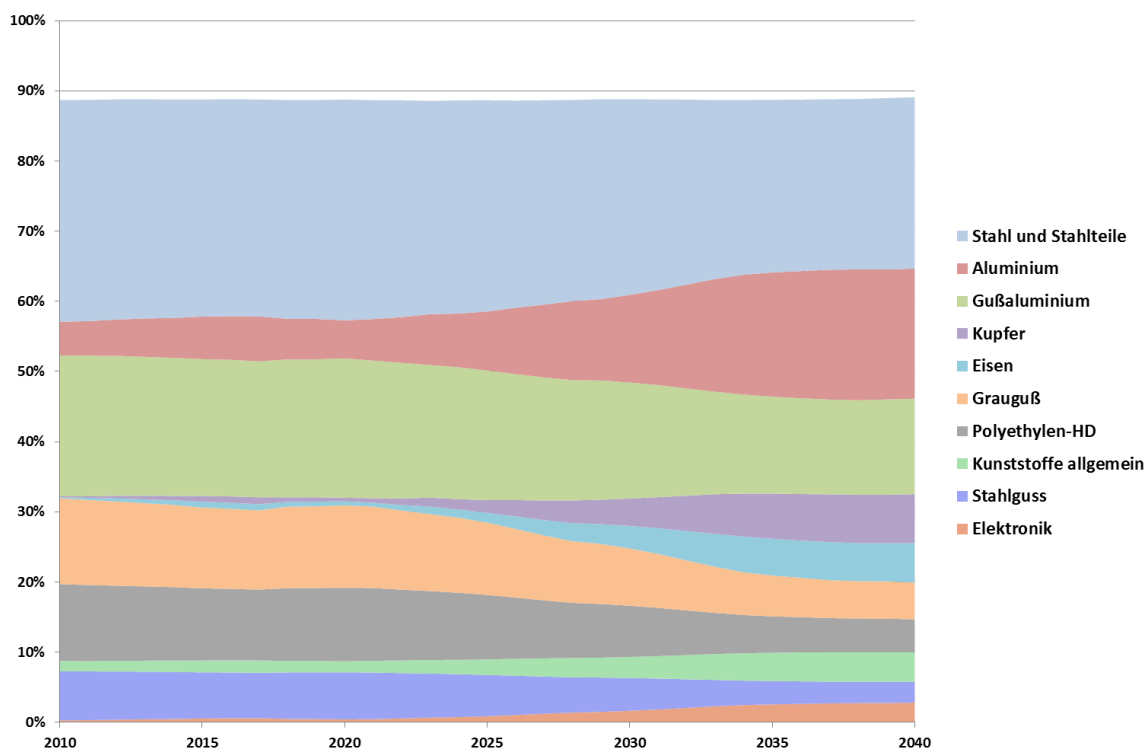


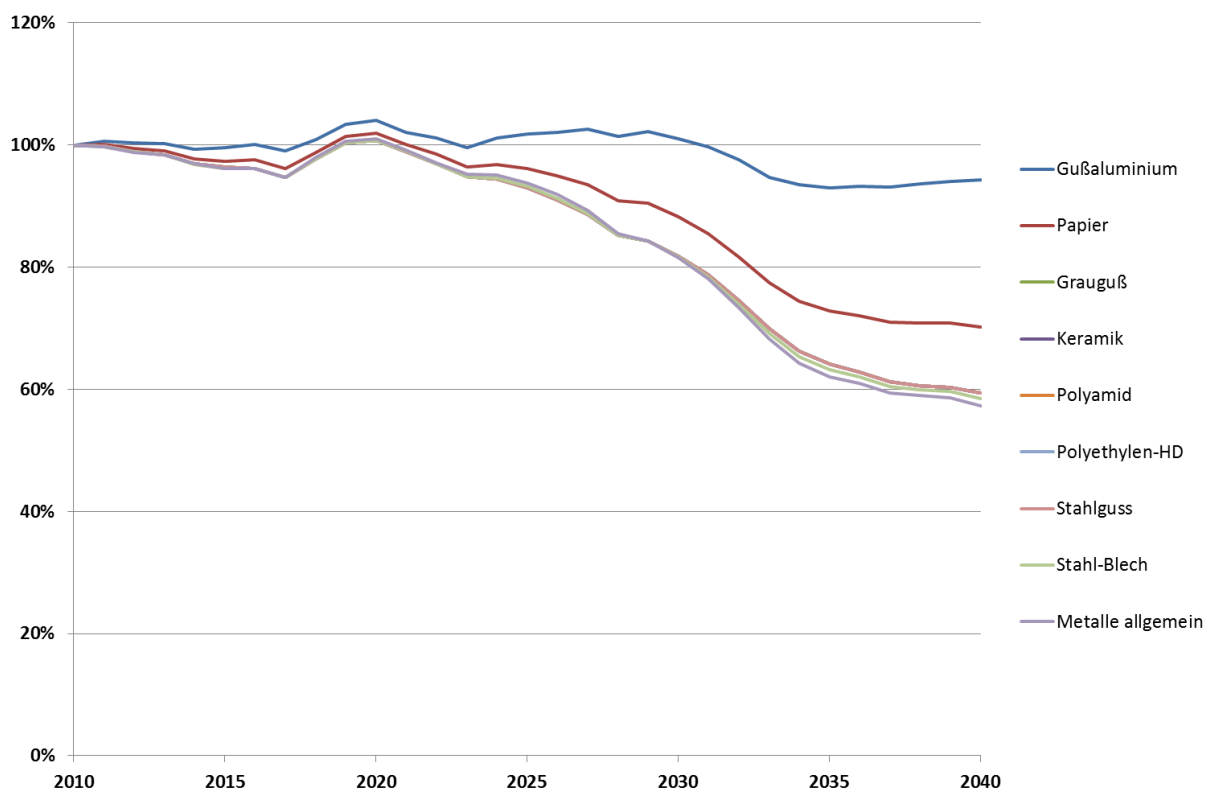
Abbildung 7.14: Zeitliche Entwicklung der Relevanz der 10 wichtigsten Werkstoffe im Basisszenario.

Quelle: DLR.

Die beiden zur Zeit häufig diskutierte Materialien Seltene Erden und Lithium gewinnen im Betrachtungszeitraum deutlich an Relevanz. Trotz des scheinbar geringen Anteils an der Gesamtmasse des Antriebsstrangs ist zu beachten, dass insbesondere im Fall der Seltenen Erden bereits geringe Nachfragesteigerungen aufgrund der derzeit unsicheren Versorgungslage zu erheblichen Preissteigerungen führen können. Hierbei ist allerdings weiterhin zu beachten, dass diese Zunahme an Relevanz sich über den gesamten Betrachtungszeitraum erstreckt und bis etwa 2025 im betrachteten Szenario nahezu keine Veränderungen zu beobachten sind. Erst mit steigender Marktdurchdringung vollelektrischer Fahrzeuge und

damit einer höheren Anzahl an leistungsstarken Elektromotoren werden Veränderungen der Relevanz sichtbar.

Aus Abbildung 7.14 geht hervor, dass die zuvor erwähnten Veränderungen erst mittel- bis langfristig ab dem Jahr 2020 einsetzen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt gibt es kaum bzw. nur insignifikante Veränderungen in der Relevanz der Werkstoffe. Dies liegt vor allem darin begründet, dass im betrachteten Basisszenario der Flottenentwicklung elektrifizierte Fahrzeuge erst zu diesem späteren Zeitpunkt in signifikanten Stückzahlen in den Markt eintreten und somit zuvor keine signifikanten Veränderungen zu beobachten sind. Dennoch gilt es für Industrie und Forschung rechtzeitig auf den einsetzenden Wandel zu reagieren und beispielsweise Ingenieure gezielt auf die Veränderungen vorzubereiten oder entsprechende Versorgungsketten zu implementieren.



**Abbildung 7.15: Werkstoffe mit abnehmender Relevanz im Basisszenario.**

Quelle: DLR.

Abbildung 7.15 stellt ausschließlich die Werkstoffe dar, welche im Betrachtungszeitraum an Relevanz verlieren. Auffällig ist hierbei, ähnlich wie bereits in der Analyse der Fertigungstechnologien, dass keiner der Werkstoffe auf unter 50% des Ausgangswertes fällt. Wie bereits zuvor erwähnt, befinden sich unter den Werkstoffen, welche an Relevanz verlieren werden, die sechs Werkstoffe mit der größten Bedeutung im Ausgangsjahr. Gleichzeitig sind gerade diese Werkstoffe von den stärksten Veränderungen betroffen.

Eine Besonderheit dieser Analyse stellt der Werkstoff Gussaluminium dar. Trotz des deutlichen Anstiegs der Relevanz von Aluminium fällt die Bedeutung von Gussaluminium im Betrachtungszeitraum. Wie aus Abbildung 7.14 hervorgeht, bleibt die Relevanz dieses Werkstoffs absolut zwar weiterhin sehr ausgeprägt und

stellt den Werkstoff mit der drittgrößten Bedeutung in 2040 dar, jedoch zeigt diese detaillierte Analyse, dass bei der Differenzierung in die Werkstoffe Aluminium und Gussaluminium ein Wechsel in der Relevanz bis 2040 zu beobachten ist. Für Industrie und Forschung bedeutet dies, dass zur Planung der zukünftigen Aktivitäten eine detaillierte und sehr feingliedrige Analyse der Bauteile essentiell ist.

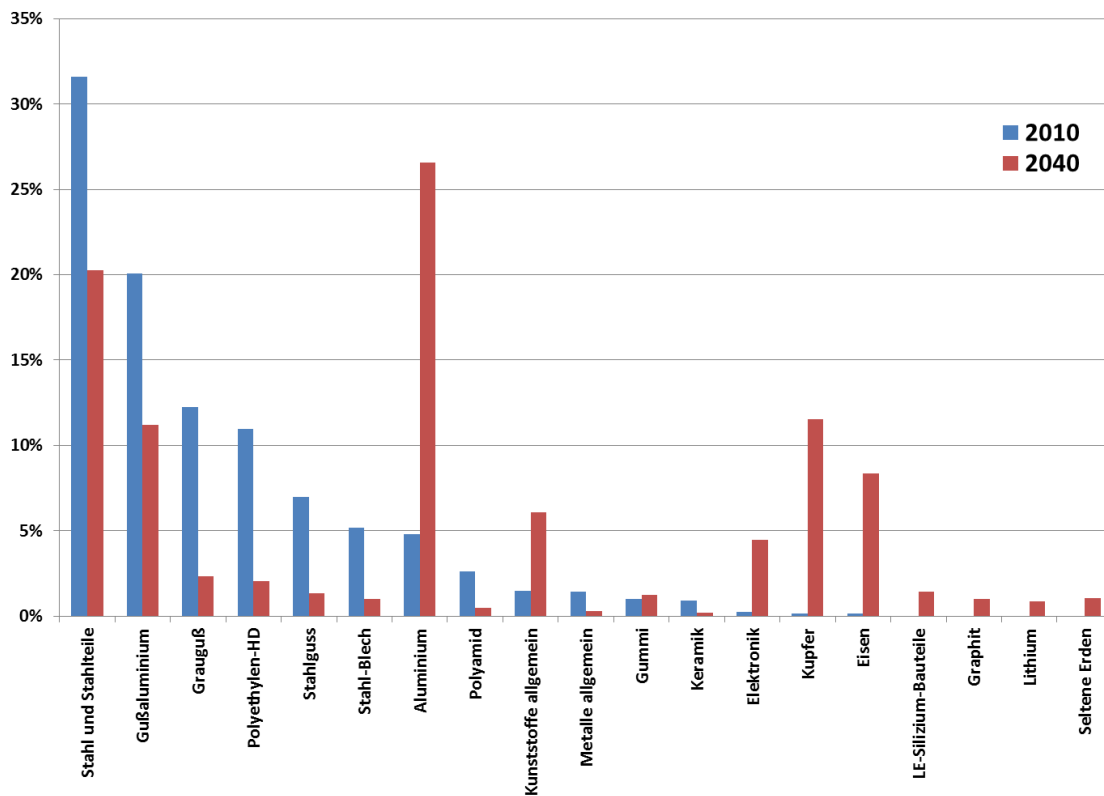
#### **7.4.2.2 Entwicklung der Werkstoffe im ersten Alternativszenario**

Wie bereits bei der Untersuchung der Entwicklung der Relevanz von Fertigungstechnologien sollen im Folgenden die Auswirkungen der beiden alternativen Fahrzeugszenarien auf die Bedeutung von einzelnen Werkstoffen untersucht werden.

Die Entwicklung der Bedeutung der Werkstoffe folgt den gleichen Mechanismen wie bereits die Entwicklung der Fertigungstechnologien im ersten Alternativszenario. Es sind die gleichen Entwicklungstrends erkennbar, allerdings sind diese deutlicher ausgeprägt als im Basisszenario. So lässt sich auch hier beobachten, dass die Werkstoffe mit der größten Relevanz im Ausgangsjahr an Bedeutung verlieren werden, und dass gleichzeitig die Metalle Aluminium, Kupfer und Eisen signifikant an Relevanz gewinnen. Dies liegt – wie bereits im Basisszenario – darin begründet, dass diese drei Metalle Hauptbestandteile von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge sind. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang der Rückgang der Relevanz von Stahl. Zwar stellt Stahl auch in 2040 noch den Werkstoff mit der zweithöchsten Bedeutung dar, der Rückgang um ein Drittel bezogen auf das Ausgangsjahr ist jedoch sehr deutlich. Diese Erkenntnis ist insbesondere für die heutige Industrielandschaft des stahlproduzierenden bzw. -verarbeitenden Gewerbes essentiell.

Seltene Erden können in diesem Alternativszenario ebenso wie Lithium ihren Anteil zwar fast verdoppeln, stellen aber auch weiterhin nur eine untergeordnete Relevanz hinsichtlich der Verteilung der Masse im Antriebsstrang dar.





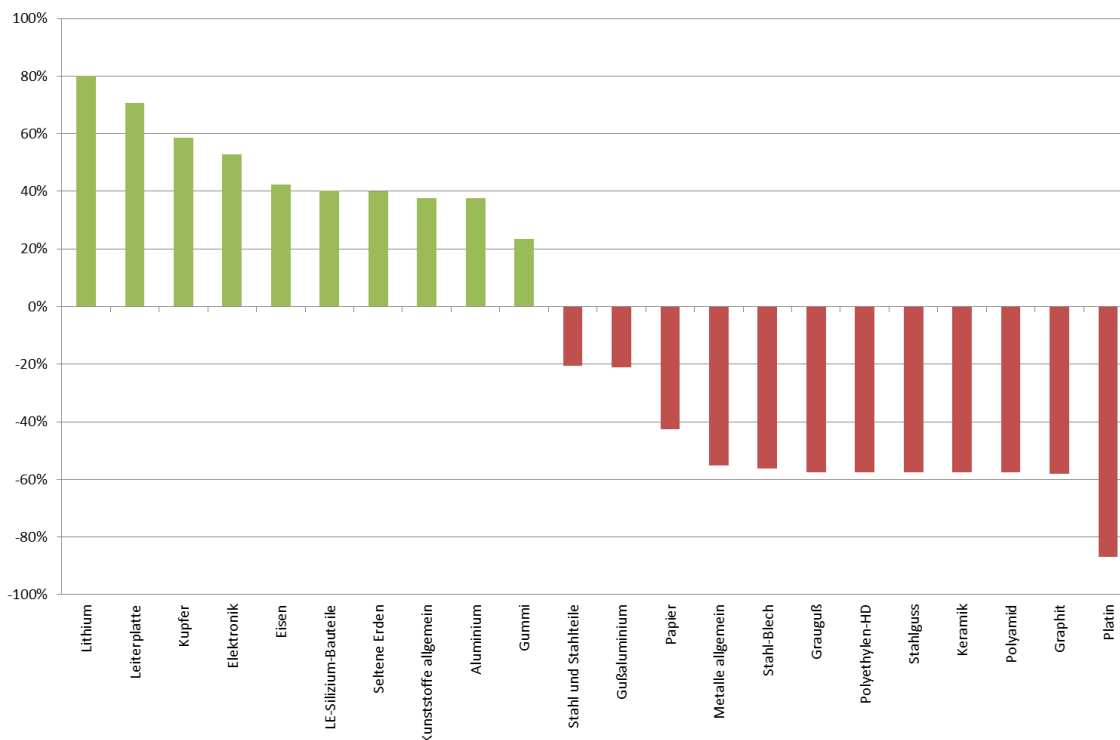
**Abbildung 7.16: Relevanz der Werkstoffe in den Stützjahren 2010 und 2040 im ersten Alternativszenario.**

Quelle: DLR.

Vergleicht man auch hier die prozentuale Veränderung der Relevanz der Werkstoffe, so fällt auf, dass sich die Höhe der Veränderung im Vergleich zum Basisszenario nochmals verstärkt. Die zuvor erwähnten Werkstoffe Lithium, Aluminium, Kupfer und Eisen erfahren auch hier bedingt durch die starke Zunahme an batterieelektrischen Fahrzeugen in der Neufahrzeugflotte eine deutliche Steigerung ihrer Relevanz. Lithium verzeichnet hierbei aufgrund der gestiegenen Anzahl an verbauten Traktionsbatterien die größte Zunahme um 80% im Vergleich zum Basisszenario. Dabei ist es bemerkenswert, dass insbesondere im Zeitraum bis 2020 der Bedarf an Lithium um mehr als das Doppelte ansteigt. Ein ähnlicher Effekt lässt sich im Fall der Seltenen Erden erkennen, wobei hier die langfristige Steigerung bis 2040 geringer ausfällt, die Steigerung im mittelfristigen Zeithorizont bis 2025 allerdings das 3,5-Fache beträgt. Hier gilt es, die Versorgungssituation auch unter diesen positiven Marktentwicklungen sicherzustellen.

Im Gegensatz dazu ist es bemerkenswert, dass aufgrund der Dominanz von Batteriefahrzeugen im Vergleich zu den in diesem Alternativszenario nahezu vollständig substituierten Brennstoffzellenfahrzeugen Werkstoffe, welche hauptsächlich für die Herstellung von Brennstoffzellensystemen verwendet werden, signifikant an Bedeutung verlieren. Hierzu zählen Materialien wie Platin, Nafion oder Aramid. Im Hinblick auf Handlungsoptionen von Industrie und Forschung ist dies als kritischer Faktor zu werten, da mit einer potentiellen Fokussierung von Industriezweigen auf die Verarbeitung bzw. die Herstellung dieser Werkstoffe signifikante wirtschaftliche Risiken verbunden sind. Eine weitere Besonderheit in diesem zweiten Szenario liegt in der Abnahme von Graphit. Aufgrund der starken Marktdurchdringung von batterieelektrischen Fahrzeugen ist zunächst mit einem Anstieg des Bedarfs an Graphit zu rechnen. Da in den betrachteten

Brennstoffzellen jedoch deutlich mehr Graphit verbaut ist als in Lithium-Ionen-Traktionsbatterien auf der Anodenseite, nimmt der Bedarf an Graphit insgesamt ab. Abbildung 7.17 stellt die prozentualen Veränderungen des ersten Alternativszenarios im Vergleich zum Basisszenario im Endjahr grafisch dar.

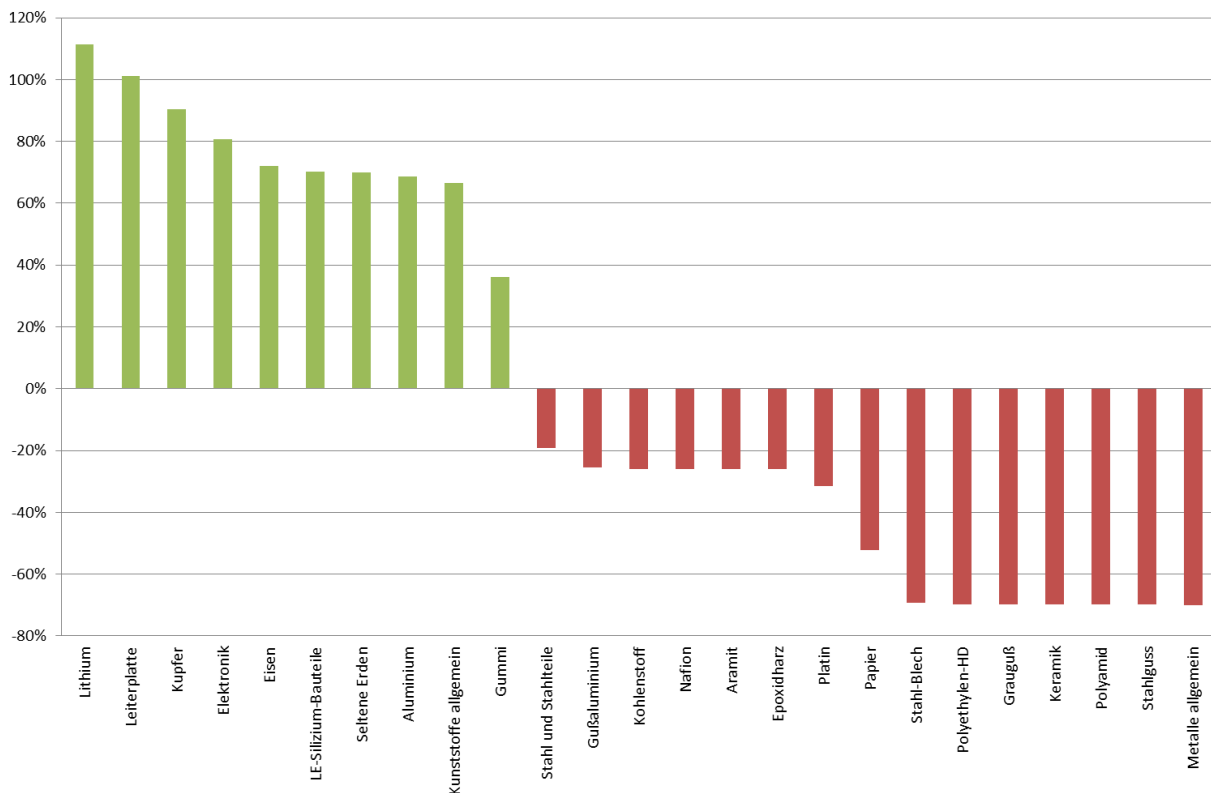


**Abbildung 7.17: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Werkstoffen des ersten Alternativszenarios im Vergleich zum Basisszenario in 2040.**

Quelle: DLR.

### 7.4.2.3 Entwicklung der Werkstoffe im zweiten Alternativszenario

Ähnlich wie in den vorangegangenen Analysen folgt auch die Entwicklung der Relevanz der Werkstoffe im zweiten Alternativszenario den zuvor identifizierten Trends, wobei auch hier das Maß der Veränderung deutlich über dem des zweiten Alternativszenarios liegt. Vergleicht man daher die Veränderung der Bedeutung der Werkstoffe in diesem dritten Szenario mit dem Referenzwert des Basisszenarios, so fällt auf, dass in diesem zweiten Alternativszenario die gleichen Werkstoffe von einer Zu- bzw. Abnahme betroffen sind wie bereits im ersten Alternativszenario. Die Höhe der Veränderung übertrifft in diesem dritten Szenario die des zweiten Szenarios jedoch deutlich, sowohl in positiver wie auch in negativer Richtung. So ergibt die Detailanalyse, dass die zuvor erwähnten Metalle Aluminium, Kupfer und Eisen in ihrer Relevanz nochmals deutlich steigen und um über 80% im Vergleich zum Basisszenario an Bedeutung gewinnen werden. Im Fall von Lithium verdoppelt sich die Relevanz sogar. Ebenso können Seltene Erden ihre Relevanz deutlich steigern. Wie bereits in den vorigen Szenarien gilt auch hier, dass der Bedarf an diesen beiden Werkstoffen im mittelfristigen Zeithorizont sogar noch deutlicher ansteigt. Abbildung 7.18 stellt die prozentuale Veränderung der Relevanz der Werkstoffe grafisch gegenüber.



**Abbildung 7.18: Prozentuale Veränderung der Relevanz von Werkstoffen des zweiten Alternativszenarios im Vergleich zum Basisszenario in 2040.**

Quelle: DLR.

Die bei der Untersuchung der Entwicklung der Fertigungstechnologien getroffene Aussage, dass eine Marktzusammensetzung mit einer Vielzahl von elektrifizierten Fahrzeugkonzepten deutlichere Veränderungen nach sich zieht, als eine Fokussierung auf batterieelektrische Fahrzeuge, bestätigt sich also auch im Fall der Werkstoffe. Es ist daher für Industrie und Forschung von großer Bedeutung, die zukünftigen Marktentwicklungen detailliert zu analysieren und somit eine robuste Ausgangslage für zukünftige Entscheidungen zu schaffen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass ähnlich wie bereits im Fall der Fertigungstechnologien die Entwicklungsrichtung der Relevanz der Werkstoffe in allen drei Szenarien gleich ist. Die Entwicklungstendenzen sind hierbei noch eindeutiger als die der Fertigungstechnologien: Die sechs bisher bedeutsamsten Werkstoffe Stahl, Gussaluminium, Grauguss, Polyethylen HD, Stahlguss sowie Stahlblech werden alle an Bedeutung verlieren. Diese Tendenz ist dabei umso deutlicher ausgeprägt, je höher der Anteil elektrifizierter Fahrzeugkonzepte an der Neufahrzeugflotte ist. Im Gegensatz dazu werden Werkstoffe wie Aluminium, Kupfer, Eisen sowie Kunststoffe signifikant an Bedeutung gewinnen. Auch hier ist die Veränderung umso stärker ausgeprägt, je höher die Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebskonzepte ist.

Seltene Erden und Lithium können ihren Anteil zwar steigern, in Relation zum gesamten Antriebsstrang ist ihr Massenanteil auch langfristig von untergeordneter Rolle, wengleich dies natürlich nichts über die Versorgungssituation aussagt. Der Bedarf an Graphit wird in allen Szenarien steigen, wobei hier deutlich zwischen einer Fahrzeugflotte mit Brennstoffzellenfahrzeugen (Basisszenario sowie 2. Alternativszenario) und

einer Flotte ohne Brennstoffzellenfahrzeugen (1. Alternativszenario) zu unterscheiden ist. Abbildung 7.19 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Entwicklung der Werkstoffe in den drei Fahrzeugszenarien. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die vorangegangene Analyse ausschließlich auf Werkstoffe bezieht, welche im Antriebsstrang verwendet werden. Für die Fahrzeugstruktur relevante Materialien wie beispielsweise CFK werden in Kapitel 4 gesondert betrachtet.

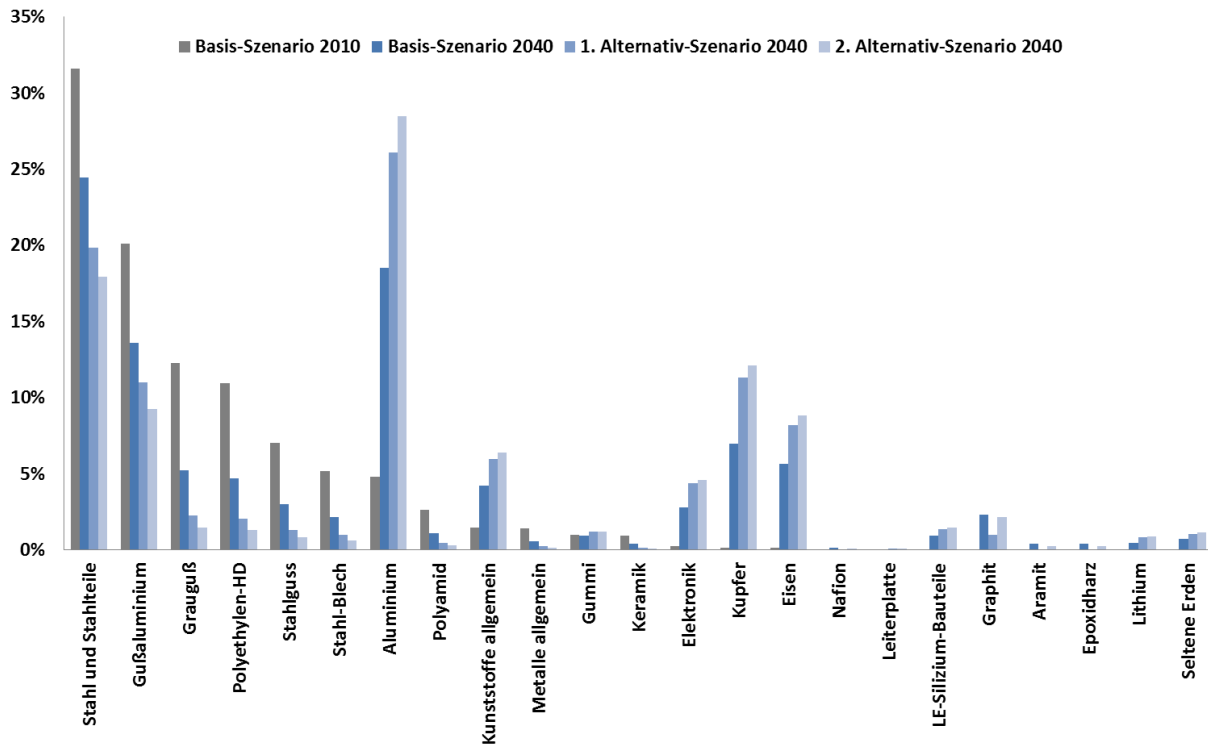


Abbildung 7.19: Überblick über die Entwicklung der Relevanz der Werkstoffe in allen drei Fahrzeugszenarien.

Quelle: DLR.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Die Detailbetrachtung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte hat gezeigt, unter welchen Bedingungen welche Veränderungen in der Fahrzeug- und Fahrzeugzulieferindustrie eintreten werden. Neuartige Antriebskonzepte werden sukzessive in den Markt eingeführt werden und stellen sowohl die Industrie als auch die Forschung vor große Herausforderungen. Die vorliegende Studie empfiehlt, bereits jetzt die notwendigen Schritte einzuleiten, um auch zukünftig schnell und flexibel auf die geänderten Marktanforderungen reagieren zu können. Das Land Baden-Württemberg verfügt hier über eine gut ausgebaute und leistungsfähige Position, sieht sich aber auch stärker dem Technologiewandel und seinen Anpassungszwängen ausgesetzt. Hier gilt: „Das Bessere ist des Guten Feind“.

Daher stehen übergreifende Themenstellungen wie der Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie unter Einbeziehung von Unternehmen aller Größenklassen und Wertschöpfungsstufen, der Wissenstransfer zwischen unterschiedlichen bereits etablierten Forschungseinrichtungen sowie der Wissenstransfer aus anderen Branchen, insbesondere im Hinblick auf neuartige Komponenten, im Vordergrund. Darüber hinaus kann nur durch eine verstärkte fachübergreifende Vernetzung unterschiedlicher Fachbereiche wie der Elektrotechnik, dem Maschinenbau oder der Mechatronik auf die sich stellenden Herausforderungen reagiert werden. Dies betrifft vor dem Hintergrund der Elektrifizierung des Antriebsstrangs alle Qualifikationsgrade vom Ingenieur bis hin zur Fachkraft.

Der Wandel der Fertigungstechnologien und damit die Verschiebung von Wertschöpfungsstrukturen bedingt eine Anpassung der heutigen Prozesse. Die in allen drei untersuchten Fahrzeugszenarien identischen Entwicklungsrichtungen der Wertschöpfungsverschiebung machen es notwendig, heutige, an Relevanz verlierende Fertigungsprozesse für zukünftige Produktionsstrukturen vorzubereiten und weiterhin hinsichtlich ihrer Effizienz, ihrer Kosten, ihrer Qualität und ihrer Geschwindigkeit zu verbessern. Gleichzeitig gilt es aber auch, neu hinzukommende und bisher nur in Nischenanwendungen vorhandene Prozesse großserientauglich zu gestalten.

Ähnlich wie die Fertigungstechnologien unterliegen auch die Werkstoffe selbst einem Wandel. Bisher in großem Maße im Antriebsstrang verwendete Materialien werden durch die einsetzende Elektrifizierung sukzessive an Relevanz verlieren. Gleichzeitig werden aber auch hier neue Materialien Verwendung finden, welche bisher nur äußerst selten verbaut werden. Vor diesem Hintergrund gilt es, bereits heute die notwendigen Schritte einzuleiten und mögliche Alternativmaterialien für den Ersatz (geo-)strategisch relevanter Werkstoffe zu finden bzw. zu entwickeln.

Für die relevanten **Schrittmachertechnologien** lassen sich die folgenden Forschungsbedarfe ableiten:

Im Bereich der **Fahrzeugstruktur** gilt es, großserientaugliche und kostenattraktive Leichtbaulösungen, z. B. durch neue Werkstofflösungen sowie intelligentes Multi-Material-Design (MMD) zu entwickeln und umzusetzen und dafür neue Lösungen im Bereich der Verbindungs- und Korrosionsschutzsysteme zu erforschen. Die Entwicklung und Verbesserung von Simulations- und Entwicklungsmethoden hilft, die Werkstoff- und Bauweisenpotentiale optimal zu nutzen. Bauweisen mit Mehrwert, z. B. in Form von Funktionsintegration oder einfacher Adaptionmöglichkeiten, eröffnen für die Zulieferindustrie die Chance, neue Kompetenzfelder zu erschließen und frühzeitig zu besetzen.

Im Themenfeld der **Verbrennungsmotoren** haben alle drei Szenarien gezeigt, dass sich bis 2040 verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge im Markt halten werden. Selbst im dritten, sehr prospektiven Szenario besitzt noch über ein Fünftel der neu zugelassenen Fahrzeuge einen Verbrennungsmotor. Daher erscheint es notwendig und sinnvoll, den in Kapitel 3.1 identifizierten Forschungsbedarf hinsichtlich Fragestellungen wie Downsizing, Aufladung und Reibungsminderung konsequent voran zu treiben.

**Traktionsbatterien** sind in allen elektrifizierten Antriebssträngen zu finden. Daher sind die in Kapitel 3.5 erläuterten Forschungsbedarfe für die zukünftige Entwicklung essentiell. Über den gesamten Bereich der Wertschöpfungskette gilt es, von der Grundlagenforschung zu Zellchemien und dem Batteriedesign die Markt- und Serienreife der Batterien zu wettbewerbsfähigen Kosten sicherzustellen. Hierzu zählen die Weiterentwicklung der Fertigungsprozesse inklusive einer zielgerichteten Verknüpfung automobilfremder Zulieferer sowie die Sicherstellung der Versorgungssicherheit an Rohstoffen.

Ähnliche Forschungsbedarfe lassen sich für die Themenfelder der **Elektromaschinen** und der **Leistungselektroniken** ableiten. Hier ist die Versorgungssicherheit insbesondere mit Seltenen Erden essentiell. Darüber hinaus ist die Kopplung der beiden Themengebiete im Sinne einer Systemintegration bis hin zu hochintegrierten Radantrieben eine Hauptentwicklungsrichtung.

**Brennstoffzellensysteme** sind derzeit nur in Kleinstserien verfügbar. Daher spielen hier insbesondere Themenstellungen in Bezug auf eine serienreife Technologieentwicklung eine tragende Rolle. Dabei sind vor allem technologische Aspekte wie beispielsweise der Einsatz von Edelmetallen von Bedeutung, um wettbewerbsfähige Produktionskosten zu erzielen. Die Analyse der Marktszenarien hat gezeigt, dass die Entwicklung und der Markterfolg von Brennstoffzellenfahrzeugen mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

Das übergreifende Themenfeld der **Fahrzeugklimatisierung** adressiert nicht nur alle Typen elektrifizierter Fahrzeugkonzepte, sondern auch die Komponenten sowie die Fahrzeugstruktur selbst. Hier gilt es, zukünftig nachhaltige, übergreifende Lösungsansätze zu entwickeln, um den veränderten Anforderungen gerecht zu werden.

Unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Mobilität ist es unabdingbar, LCAs und Ökobilanzen für alle Werkstoffgruppen durchzuführen. Konzeptbestimmend ist dies z. B. erkennbar für CFK-Strukturwerkstoffe oder die Funktionsmaterialien für Batterie und Brennstoffzelle. Eine querschnittliche Studie kann helfen, Alleinstellungsmerkmale auszubauen, abzusichern oder Fehleinschätzungen zu vermeiden.

Eine weitere empfohlene Beobachtung betrifft die geostrategischen Versorgungs- bzw. Verknappungsrisiken. Ebenfalls querschnittlich angelegt könnten damit für Schlüssel- und Schrittmachertechnologien relevante Werkstoffe, Risiken für die Wirtschaft am Standort und auch Alternativlösungen aufgezeigt werden.

Die durchgeführte Strukturanalyse hat technologische Veränderungen herausgearbeitet und Trendentwicklungen beschrieben. Die vorliegende Studie kann somit die Basis für einen baden-württembergischen Abgleich sein, bei dem matrixartig die Komponenten und Potentiale der Unternehmen am Standort mit den künftigen Bedarfen verknüpft werden. Die hier bereits erfolgreich eingesetzte Workshop-Moderation mit den Experten der Region könnte dafür wieder genutzt werden.

Das Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR und seine an der Studie beteiligten Partner danken dem Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg für die Möglichkeit, an dieser aktuellen und querschnittlichen Aufgabe arbeiten zu können.

## Literaturverzeichnis

- Adam, A., M. Prefot, et al. (2010). "Kurbelwellenlager für Motoren mit Start-Stopp-System." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(12).
- Adomeit, P., A. Sehr, et al. (2010). "Zweistufige Turboaufladung – Konzept für hochaufgeladene Ottomotoren." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(05).
- Anderman, M. (2000). Brief Assessment of Improvements in EV Battery Technology since the BTAP June 2000 Report.
- Anderson, D. L. und D. Patiño-Echeverri (2009). AN EVALUATION OF CURRENT AND FUTURE COSTS FOR LITHIUM-ION BATTERIES FOR USE IN ELECTRIFIED VEHICLE POWERTRAINS Nicholas School of the Environment, Duke University.
- AP (2010a): VDA schließt sich globalem Standard für Klimaanlage-Kältemittel an. <http://www.automobilproduktion.de/2010/05/vda-schliesst-sich-globalem-standard-fur-klimaanlagen-kaltemittel-an/> - Aktualisierungsdatum: 20.05.2010.
- AP (2010b): Wärmepumpe im Toyota Prius Plug-In. <http://www.automobilproduktion.de/2010/08/waermepumpe-im-toyota-prius-plug-in/> - Aktualisierungsdatum: 24.08.2010.
- AP (2011). "BMW sieht in Kooperation mit SGL die richtige Strategie." Automobil-Produktion.
- Artur, C., F. Lemaitre, et al. (2010). "Wälzgelagerte Nockenwelle zur Reduzierung von Reibungsverlusten." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(03).
- Automobilindustrie (2011): Interview mit Michael Macht, Vorstand Produktion, Volkswagen: Konzernweite Standardisierung durch MQB. <http://www.automobilindustrie.vogel.de/produktion/articles/335304/>.
- Babiel, G. (2009). Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik, Vieweg + Teubner Verlag.
- Ballard (2004): Light duty fuel cell engine Xcellsis HY-80. <http://www.ballard.com>.
- BCG (2010). Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020, The Boston Consulting Group.
- Beeh, E. und A. Hölderlin (2011). Magnesiumentwicklung der Jiatong Uni Shanghai. Expertenaustausch anlässlich eines persönlichen Besuchs. Shanghai 30.05.2011
- Beeh, E. und M. Kriescher (2010). Alternative Antriebe – geänderte Crashbedingungen – neue Anforderungen und Chancen für Vorderwagenstrukturen. Karosseriebautage Hamburg 2010. 11. Internationale Tagung Karosseriebau Passive Sicherheit Hamburg ATZlive.
- Beetz, K., U. Kohle, et al. (2010). "Beheizungskonzepte für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben." ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift(04).
- Behr (2009). Thermomanagement bei Hybridfahrzeugen. Technischer Pressetag der Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart.
- Behrendt, M. (2010). Problemstellungen für elektrifizierte Antriebskonzepte. AELFA Workshop. Stuttgart.
- BGR (2009). Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Bundesrepublik Deutschland Rohstoffsituation. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Heft XXXIX.
- BMBF (2010). Elektromobil in die Zukunft - Batterieforschung als Schlüssel. Bonn, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referat Nanomaterialien, Neue Werkstoffe.



BMU (2010). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. N. u. R. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel, Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow.

BMU (2011). Bekanntmachung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit über die Förderung von Vorhaben im Bereich der Elektromobilität, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

BMVBS (2011). Elektromobilität – Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter.

BMW (2011): Produktvorinformation BMW i3 Concept. Das Megacity Vehicle. [http://www.bmw-i.de/de\\_de/bmw-i3/](http://www.bmw-i.de/de_de/bmw-i3/).

Braess, H.-H. und U. Seiffert, Hrsg. (2007). Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg+Teubner Verlag

Buchmann, I. (2003): Die Nickel-Kadmium-Batterie, ihre Dominanz und Zukunft. <http://batteryuniversity.com/partone-4-german.htm>.

Buchmann, I. (2009). Batteries in a Portable World, Vieweg und Teubner Verlag.

Bundesregierung, D. (2011). Regierungsprogramm Elektromobilität, BMWI, BMVBS, BMU, BMBF.

COM (2007). Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius: The way ahead for 2020 and beyond.

COM (2009). Dealing with the impact of an ageing population in the EU (2009 Ageing Report). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.

COM (2011a). A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050.

COM (2011b). Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. E. Commission.

Dahlmann, P. (2009). Bedeutung von Stahl als industriellem Basiswerkstoff. acatech Journalistenworkshop „Werkstoffe“. München.

Deffner, J. (2011). Schneller, öfter, weiter: Herausforderungen für eine mobile Gesellschaft von morgen. 13. Junges Forum der ARL. 13. bis 15. Oktober 2010 in Mannheim.

DERA (2011). Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet? H. Elsner, Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

Dick, M. (2011). „Automobil-Leichtbau „Kein Pappentiel“.“ LightweightDesign(02).

Die Bundesregierung (2009). Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung.

Die Bundesregierung (2011). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.

DoE (2007). Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program. Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Planned Program Activities for 2005-2015. Technical Plan Fuel Cells 2007, U.S. Department of Energy.

DOE (2011). One Million Electric Vehicles By 2015. February 2011 Status Report, U.S. Department of Energy

Dudenhöffer, F. (2010). „Hochvolt-Energiespeicher - Konkurrenz in Deutschland, Europa und Asien.“ ATZ elektronik (04).

- Durst, K. (2010). Vorsprung durch Technik – Die AUDI Leichtbaustrategie. Zulieferertag Automobil Stuttgart.
- Durst, K. (2011). Bewertung der Bauteileignung für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Werkstoffsymposium Fahrzeugtechnik. Stuttgart.
- Eckstein, L., F. Schmitt, et al. (2010). "Leichtbau bei Elektrofahrzeugen." ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift(11): 788-795.
- EEA (2011). Laying the foundations for greener transport, European Environmental Agency. EEA Report 7/2011.
- Fahr, M., W. Hanke, et al. (2011). "Reibungsreduzierung bei Kolbensystemen im Ottomotor." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(08).
- Feuerecker, G., B. Schäfer, et al. (2005). Auxiliary heating systems of conventional and heat pump type: Technology, Performance and Efficiency. Vehicle Thermal Management Systems Conference & Exposition. Toronto, Ontario, CANADA.
- Fink, T. und H. Bodenstern (2011). "Möglichkeiten der Reibungsreduktion in Kettentrieben." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(08).
- Fischer, R. (2009). Die Elektrifizierung des Antriebs – vom Turbohybrid zum Range Extender. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Wien.
- Friedrich, H. E. und E. Beeh (2008a). Multi-Material-Design (MMD) in the vehicle body. Innovative technologies for Road transport and personal mobility. Eindhoven, Niederlande.
- Friedrich, H. E., E. Beeh, et al. (2008b). Cost attractive lightweight solutions through new Mg-concepts for the vehicle structure. 65th Annual World Magnesium Conference. Warschau, Polen.
- Friedrich, H. E. und D. Hülsebusch (2010). "Elektrofahrzeuge und Leichtbau: Notwendigkeit und Lösungsansätze zur Reduktion der Fahrzeugmasse bei Elektrofahrzeugen " Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft ZfAW 2010(Heft 4): Seite 46-52.
- Friedrich, H. E., G. Kopp, et al. (2009). "Innovative Fahrzeugstruktur in Spant- und Space-Frame-Bauweise." ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 111(01): 52-58.
- FTD (2010). Chinas Ausfuhrbeschränkungen: Seltene Erden werden noch knapper Financial Times Deutschland.
- Gand, B. (2011). "Beschichtung von Zylinderlauflächen in Aluminium-Kurbelgehäusen." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(02).
- GE Transportation (2009): GE Selects Site for Advanced Battery Manufacturing Center. [http://geenergystorage.com/pr\\_002.html](http://geenergystorage.com/pr_002.html).
- Geiger, O. (2005). Basics of LFT materials and LFT processing. EU SuperLightCAR Project Meeting. Aachen.
- Genender, P., F.-W. Speckens, et al. (2011). "Akustikentwicklung von Range Extendern für Elektrofahrzeuge." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(03).
- Giacomo, T. D., S. Brandin, et al. (2010). "Zahnriemen im Motorölbad als Ölpumpenantrieb." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(12).
- Goede, M. (2011). Demands of electromobility on future car body lightweight design. Materials in Car Body Engineering. Bad Nauheim.
- Götz, K., W. Loose, et al. (2003). Mobilitätsstile in der Freizeit: Minderung der Umweltbelastungen des Freizeit- und Tourismusverkehrs., Umweltbundesamt.

- Großmann, H. (2010). Pkw-Klimatisierung. Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung, Springer Verlag.
- Gu, J. L., K. D. Chang, et al. Delayed fracture properties of 1500 MPa bainite/martensite dual-phase high strength steel and its hydrogen traps, Department of Materials Science and Engineering, Laboratory of Advanced Materials, Materials Research Center, Tsinghua University, Beijing, 100084, CHINE.
- Heckenberger, T. (2009). Kühlung von Li-Ionen-Batterien – mehr als nur eine weitere Kühlungsaufgabe. Technischer Pressetag der Behr GmbH & Co. KG, Stuttgart.
- Heinzel, A., F. Mahlendorf, et al., Hrsg. (2006). Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung. Heidelberg, C.F. Müller.
- Hertrampf, W.-C. (2009). Recherche zu Nutzungsmöglichkeiten von Holzwerkstoffen in der Fahrzeugstruktur. Institut für Fahrzeugkonzepte. Stuttgart, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- Hohenthal, M. v. (2009). "Drei Lösungen für bessere Motoren." ATZextra(09).
- Howell, D. (2011). IA-HEV Annex I report: United States. International Energy Agency Implementing Agreement for co-operation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes. Task 1 Meeting. Lissabon, Portugal.
- Hug, K. (2010). Lithium-Ionen Batterien für Elektrofahrzeuge - Eine Marktübersicht. Präsentation
- Hünemörder, W. (2004). Elektrisch betriebene Wärmepumpe mit dem für Fahrzeuge mit dem Kältemittel R744 (CO<sub>2</sub>). 6. Fahrzeugklima-Symposium - Standklimatisierung und Wärmepumpenheizung im Kfz. J. Reichelt. Karlsruhe, Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (TWK).
- HZG (2001): Magnesium Award 2011: Wissenschaftler für neue Hochleistungs-Legierung ausgezeichnet. [http://www.hzg.de/public\\_relations/press\\_releases/012197/index\\_0012197.html.de](http://www.hzg.de/public_relations/press_releases/012197/index_0012197.html.de).
- IEA-HEV (2011). Hybrid and Electric Vehicles: The Electric Drive Plugs In. International Energy Agency Implementing Agreement for co-operation on Hybrid and Electric Vehicle Technologies and Programmes. Annual Report of the Executive Committee and Task 1 over the year 2010-.
- IEA (2010). World Energy Outlook 2010. Paris, International Energy Agency: 736.
- infas-DLR (2010). Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht Struktur-Aufkommen-Emissionen-Trends, infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Bonn, und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrsforschung, Berlin.
- IPT (2010). Laserunterstützte Verarbeitung von Thermoplastischen Faserverbundkunststoffen. Brochüre, Fraunhofer- Institut für Produktionstechnologie IPT.
- J. Eberspächer GmbH & Co. KG (2011a): Eberspächer Luftheizungen Airtronic. <http://www.eberspaecher.com/-fahrzeugheizungen/produktportfolio/luftheizungen.html>.
- J. Eberspächer GmbH & Co. KG (2011b): Eberspächer Wasserheizungen Hydronic. <http://www.eberspaecher.com/fahrzeugheizungen/produktportfolio/wasserheizungen.html>.
- Jäger, H. (1989). "Zielgruppenmodell im Öffentlichen Personennahverkehr." Die Bundesbahn 65(8).
- JAMA (2011): Low-Emission Vehicle Shipments 2008-2010. [http://www.jama-english.jp/statistics/low\\_emission](http://www.jama-english.jp/statistics/low_emission).
- Junker, H. K. (2011). "Die Zukunft des Verbrennungsmotors." ATZextra 2011(04).
- Kalmbach, R., W. Bernhart, et al. (2011). Automotive landscape 2025: Opportunities and challenges ahead, Roland Berger Strategy Consultants.
- KBA (2011). Neuzulassungsbarometer, Kraftfahrtbundesamt.

- Ketterer, B., U. Karl, et al. (2009). Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Karlsruhe, Institut für Materialforschung I, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- Klassen, V., M. Leder, et al. (2011). "Klimatisierung im Elektrofahrzeug." ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift(02).
- Klein, B., M. Möritz, et al. (2011). Efficient propulsion for mass production Electric Vehicles. Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Braunschweig.
- Königstein, A., D. Grebe, et al. (2008). "Differenzierte Analyse von Downsizing-Konzepten." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2008(06).
- Korte, V., N. Fraser, et al. (2011a). "Effizientes Downsizing für zukünftige Ottomotoren." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2011(05).
- Korte, V., D. Hancock, et al. (2008). "Downsizing-Motor von Mahle als Technologiedemonstrator - Konzept, Auslegung und Konstruktion." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2008(01).
- Korte, V., G. Lumsden, et al. (2011b). "30 % höhere Effizienz bei 50 % weniger Hubraum." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2010(03).
- Krebs, G., R. Weber, et al. (2010). "Elektrische Radnabenmotoren für leichte Stadtfahrzeuge." ATZelektronik 5(01).
- Kroll, M. (2011). Kostenentwicklung von Traktionsbatterien. Diplomarbeit Institut für Fahrzeugkonzepte. Stuttgart, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Landerl, C. (2004). Der neue BMW Reihensechszylinder Ottomotor mit Magnesium-Aluminium-Verbundkurbelgehäuse. Bayern innovativ. Passau
- Laquian, A. A. (2008). THE PLANNING AND GOVERNANCE OF ASIA'S MEGA-URBAN REGIONS. UNITED NATIONS EXPERT GROUP MEETING ON POPULATION DISTRIBUTION, URBANIZATION, INTERNAL MIGRATION AND DEVELOPMENT. New York.
- Lau, M. und D. R. Ouwenga (2011). "Entwicklungspotenziale bei Kompressoren zur Motoraufladung." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(10).
- Lee, J. H. und J. P. Hong (2008). "Permanent Magnet Demagnetization Characteristic Analysis of a Variable Flux Memory Motor Using Coupled Preisach Modeling and FEM " IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 44(6): 1550 - 1553.
- Linden, D. und T. B. Reddy (2001). Handbook of batteries, McGraw-Hill.
- Malnati, P. (2008). "WHAT'S NEW IN AUTOMOTIVE FRONT-END MODULES - Composite and hybrid composite/metal solutions reduce cost and weight and increase assembly efficiency on passenger vehicles." Composites Technology Magazine (December 2008).
- Manfre, G. (2006). Strahlungsglaseinheit. E. ISOCLIMA S.p.A., Padova, IT. Italien. Patentanmeldung DE000060304091T2.
- Manski, R., M. Weinbrenner, et al. (2006). "Speicher-Klimatisierung für Hybridfahrzeuge mit Start-Stopp-Funktion." ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 108(12).
- Mardorf, L. und P. Menger (2010). PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge. Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a. Bericht 2010. D. K.-u. K. Verein.
- Mastrangelo, G., D. Micelli, et al. (2011). "Extremes Downsizing durch den Zweizylinder-Ottomotor von Fiat." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2011(02).

- Mauch, A., J. Tophoven, et al. (2011). "Potenziale und Grenzen des Downsizings beim Dieselmotor." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(08).
- McK (2010). The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. M. Company.
- Meyer, M. (2011). Ökologische Bewertung von Fahrzeugteilen aus Magnesium. Diplomarbeit Institut für Fahrzeugkonzepte. Stuttgart, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- Millard-Ball, A. und L. Schipper (2010). "Are We Reaching Peak Travel? Trends in Passenger Transport in Eight Industrialized Countries." Transport Reviews 31(3): 357-378.
- Mock, P. (2010). Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte Stuttgart, Universität Stuttgart.
- Naunin, D., (Hrsg.) (2007). Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen. Kontakt & Studium, Expert Verlag.
- NHTSA (2011): Statement of the National Highway Traffic Safety Administration On Formal Safety Defect Investigation of Post-Crash Fire Risk in Chevy Volts <http://www.nhtsa.gov/PR/Volt> - Aktualisierungsdatum: Friday, November 25, 2011.
- Oertel, D. (2008). Energiespeicher- Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring »Nachhaltige Energieversorgung«, BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG.
- Parspour, N. (2010). Elektromechanische Energiewandlung in Fahrzeugen – Anforderungen und Möglichkeiten. AELFA Workshop 2: Komponenten elektrifizierter Antriebe. Stuttgart.
- Philipps, F. (2006). Balance of Plant, WP4, in Final FCTESTNET Meeting 2006: Estoril.
- Region Hannover (2005). Integrierte Verkehrsentwicklungsplanung der Region Hannover. Verkehr in der Region Hannover: Zusatzsanalyse und Handlungsansätze.
- Reichert, J. und P. Schäfer (2010). "Reibungsreduzierende Motorabdichtung bei Nutzfahrzeugmotoren." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(04).
- Renner, M. und T. Koppe (2004). Thermomanagement von Elektro-Fahrzeugen. PKW Klimatisierung III. J. Hofhaus. , Expert-Verlag. PKW-Klimatisierung III.
- Roß, T. und H. Zellbeck (2010). "Neues ATL-Konzept von Vierzylinder-Ottomotoren." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(12).
- Rückauf, J. und B. Lerch (2009). "Möglichkeiten der Reibungsreduktion in Kettentrieben." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 70(08).
- Sachs, W. (2011). Voruntersuchungen für optimale Batteriekastenformen in Elektrofahrzeugen in Aluminiumbauweise. ATZ-Fachtagung Werkstoffe im Automobilbau 2011 Stuttgart.
- Schavan, A. (2007). Vorwort zur Veröffentlichung „Klimaschutz durch Werkstoffinnovationen im Automobilbau“. Bonn, Berlin, Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Schick, H., M. Buchmann, et al. (2009). "Kunststoffkomponenten für Abgasturbolader." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 70(09).
- Schlick, T., G. Hertel, et al. (2011). Zukunftsfeld Elektromobilität - Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Roland Berger Strategy Consultants und VDMA.
- Schmid, A. und M. Bargende (2011). "Wirkungsgradoptimierter Ottomotor." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 72(12).

- Schmid, J. (2010). "Reibungsoptimierung von Zylinderlaufflächen aus Sicht der Fertigungstechnik." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 71(06).
- Schommers, J., R. Weller, et al. (2011). "Downsizing beim Dieselmotor." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2011(02).
- Schöttle, M. (2007). "Neuer Antrieb ohne Zähne." Automobil-Produktion(Okttober 2007).
- Schubert, S. (2009). "Steigende Verkehrskosten – soziale und räumliche Dimension." Informationen zur Raumentwicklung(Heft 12.2009).
- Seibt, C., W. Loibl, et al. (2010). mobility\_techrends - Schlüsseltechnologien für die Mobilität 2030. Zwischenbericht Juni 2010.
- SLC (2008a). Multi-material Lightweight Vehicle Structure. Status Final SLC-Body Concept, May 2008, EU-Project „SuperLightCar“, Volkswagen Group Research
- SLC (2008b). "SLC-Cost Tool" zum Vergleich unterschiedlicher Fertigungsverfahren. EU-SuperLightCAR(SLC)-Projekt.
- Sondermann, M. (2008). "Trends in der Fahrzeugklimatisierung und Übersicht der energetischen Bedarfe und Potenziale."
- Sorger, H., W. Schöffmann, et al. (2011). "Der Verbrennungsmotor als Schlüsselkomponente." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 2011(03).
- Stütze, R., H.-P. Gröter, et al. (2011). "Elektrifizierung auf dem Weg zur Großserie." ATZelektronik 6(01).
- Thielmann, A. und R. Isenmann (2010). Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.
- Tiemann, C., C. Steffens, et al. (2009). "Zahnriemen versus Kette - Studie zum CO<sub>2</sub>-Sparpotenzial im Steuertrieb." MTZ - Motortechnische Zeitschrift 70(05).
- Tillmetz, W. (2008). "Lithium-Ionen-Batterien - Materialstrategie und Positionierung." ATZelektronik(05).
- TRAMP (2006). Szenarien der Mobilitätsentwicklung unter Berücksichtigung von Siedlungsstrukturen bis 2050, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- UN (2005). Proceedings of the United Nations Expert Group Meeting on Social and Economic Implications of Changing Population Age Structures Mexico City, 31 August - 2 September 2005.
- UN (2006). World Population Prospects. The 2006 Revision, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- UN (2007). World Economic and Social Survey 2007: Development in an Ageing World. New York.
- UN (2010). World Urbanization Prospects. The 2009 Revision, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- VDE (2010). Elektrofahrzeuge – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. ETG Task Force Elektrofahrzeuge. Frankfurt am Main, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik.
- Viehweger, B. (2011). LEICHTBAUTECHNOLOGIE IM AUTOMOBIL. V. Automobilzuliefertag „Herausforderung Elektromobilität“. Frankfurt (Oder).
- Visco, S. J., E. Nimon, et al. (2009). Lithium/Air Semi-fuel Cells: High Energy Density Batteries Based On Lithium Metal Electrodes. Scalable Energy Storage: Beyond Lithium Ion. Almaden Institute 2009.
- von Helmholtz, R. und U. Eberle (2007). "Fuel cell vehicles: Status 2007." Journal of Power Sources 165(2): 833-843.

Wallentowitz, H., A. Freialdenhoven, et al. (2009). Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Technologien, Märkte und Implikationen, Vieweg+Teubner Verlag.

Wallentowitz, H. und K. Reif (2006). Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen Wiesbaden Vieweg Verlag.

Weinowski, R., A. Sehr, et al. (2009). Zukünftiges Downsizing bei Ottomotoren- Potentiale und Grenzen von 2- und 3-Zylinder Konzepten. 30. Internationales Wiener Motorensymposium 2009. Wien.

Winterhagen, J., (Hrsg.) (2009). Das InCar-Projekt von ThyssenKrupp. ATZ extra.

Wittich, H. (2011): Erlkönig VW Golf VII: Neuer Golf als GTI und Fünftürer erwischt. <http://www.automotor-und-sport.de/news/vw-golf-vii-der-neue-golf-kommt-2013-der-golf-vii-wird-attractiver-und-edler-1417043.html> - Aktualisierungsdatum: 2.11.2011.

WM-BW, (Hrsg.) (2010). Strukturstudie BW<sup>e</sup> mobil: Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg und Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH.



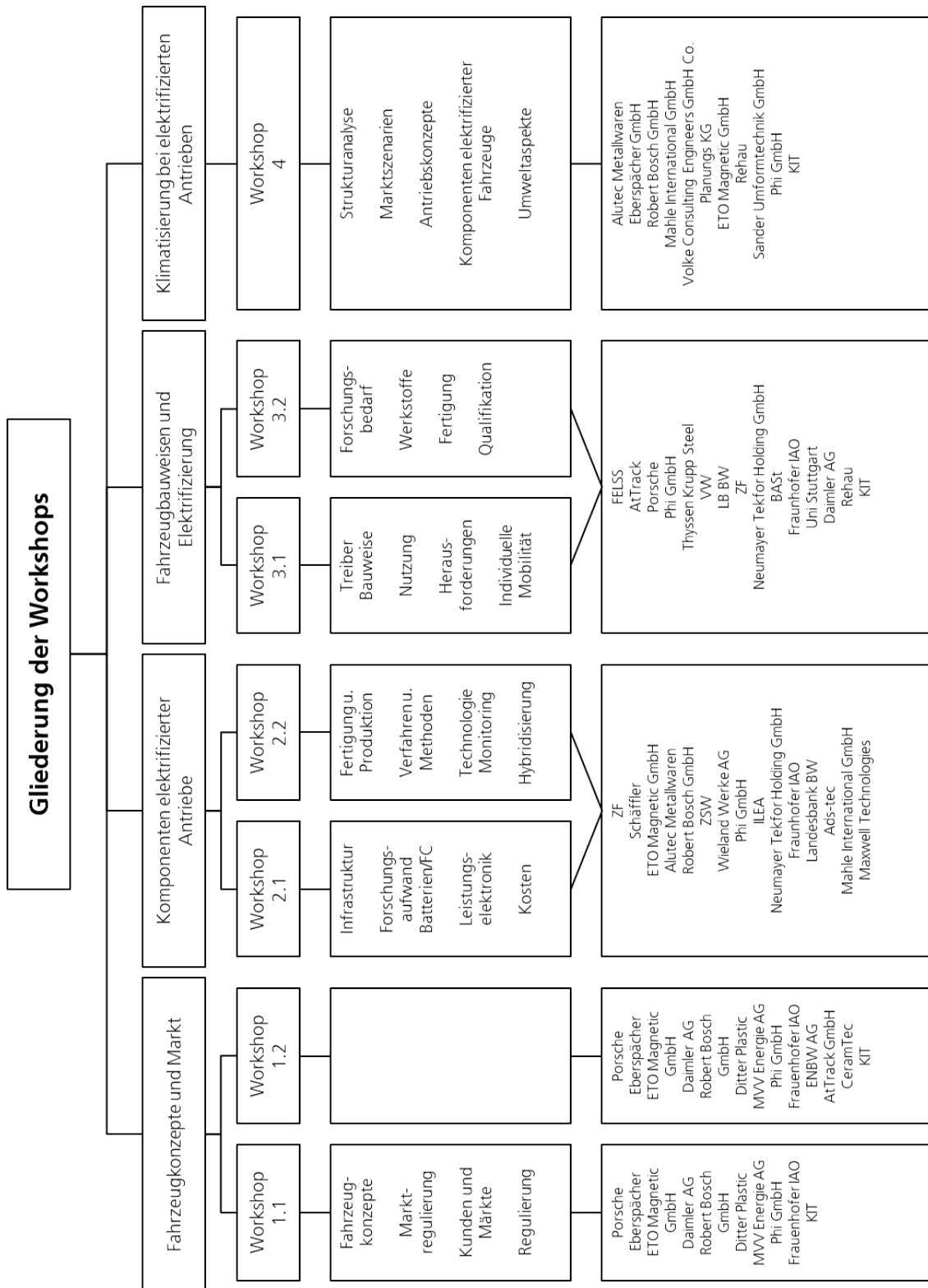
# Anhang

## Betrachtete Fertigungsverfahren

Fertigungsverfahren	Beschreibung
Ätzen	Die (örtliche) Abtragung von Material durch ätzende Stoffe, beispielsweise bei der Herstellung von Leiterplatten
Beschichten	Aufbringen einer festhaftenden Schicht auf der Oberfläche von Werkstücken
Bestücken	Aufbringen elektronischer Bauteile auf eine Platine
Biegen	Umformendes Fertigungsverfahren, bei dem durch ein Biegemoment gezielt eine plastische Verformung erreicht wird
Bohren	Spanabhebendes Verfahren zur Herstellung zylindrischer Vertiefungen
Clinchen	Durchsetzfügen ist ein Verfahren zum Verbinden von Blechen ohne Verwendung eines Zusatzwerkstoffes.
Drehen	Zerspanendes Fertigungsverfahren für Metalle und Kunststoffe, meist für rotationssymmetrische Bauteile
Druckguss	Urformverfahren, bei dem vorwiegend metallische Werkstoffe als flüssige Schmelze unter hohem Druck in eine Gussform gedrückt werden
Eindrücken	Verbinden von Bauteilen, bei denen zwei Teile formschlüssig ineinander gefügt werden
Einpressen	Mechanische Verbindungstechnik, bei der zwei Bauteile durch eine Presspassung kraftschlüssig verbunden werden
Elektroerodieren	Hochpräzises Metallbearbeitungsverfahren, bei dem durch gezielte elektrische Entladungen zwischen Werkzeug und Werkstück Material abgetragen wird.
Elektronik bestücken	Aufbringen elektronischer Bauteile auf eine Platine
Extrudieren	Das Pressen zähflüssiger härtpbarer Materialien wie z. B. von Kunststoffen durch eine speziell geformte Düse
Extrusionsblasformen	Herstellung dünner Kunststofffolien
Foliengießen	Herstellung von wickelbaren Kuststoffolien aus der Schmelze
Fräsen	Zerspanendes Fertigungsverfahren für Metalle und Kunststoffe
Galvanisieren	Elektrochemische Abscheidung von metallischen Überzügen, meist mit Hilfe elektrolytischer Bäder
Gewindeschneiden	Spanendes Verfahren zur Herstellung von Gewinden in Fertigteilen (Dreh- und Frästeile)
Gießen	Urformverfahren, bei dem ein flüssiger Werkstoff nach dem Erstarren einen festen Körper mit vorbestimmter Form bildet - hier Niederdruckgussverfahren
Glühen	Wärmebehandlungsverfahren für metallische Werkstücke zur Erzielung definierter Werkstoffeigenschaften
Härten	Wärmebehandlungsverfahren für Stahl zur gezielten Änderung und Umwandlung des Gefüges.
Heißpressen	Herstellen von Bauteilen durch Heiflieprozesse
Hochdruckblechumformung	Verfahren zur Blechumformung, bei dem ein Hohlkörper unter hohem Innendruck plastisch verformt wird und die Form des Werkzeugs annimmt
Honen	Zerspanendes Feinbearbeitungsverfahren zur Verbesserung der Maß- und Formgenauigkeit und der tribologischen Eigenschaften
Kaltpressen	Herstellung von Bauteilen durch Kaltfliepressprozesse
Kalzinyieren	Erhitzung von Materialien, z.B. Aluminiumoxid, zur Entfeuchtung
Karbonisieren	auch Bekohlen genannt, bezeichnet die Bedeckung von Elektrodenoberflächen mit einem Kohleberzug zur Steigerung der Wärmeabstrahlung
Kleben	Stoffschlüssiges Fügeverfahren, bei dem zwei Werkstoffe mit Hilfe eines Klebstoffs verbunden werden
Kokillenguss	Urformverfahren, bei dem ein flüssiger Werkstoff durch die Schwerkraft die Hohlräume der Gussform ausfllt
Lackieren	Beschichtungsverfahren für Oberflächen durch Auftrag von flüssigem oder pulverförmigem Beschichtungsstoff
Löten	Thermisches Fügeverfahren, bei dem zwei werkstoffe stoffschlüssig verbunden werden
Montage	Zusammenbau von vorproduzierten Einzelteilen, z.B. durch Schrauben

Fertigungsverfahren	Beschreibung
Nieten	Herstellung einer nicht lösbaren, formschlüssigen Verbindung durch Einbringen eines plastisch verformbaren zylindrischen Verbindungselements
Nitrieren	Oberflächen-Härteverfahren für Stähle durch gezielte Diffusion von Stickstoff in oberflächennahe Schichten
Polieren	Polieren ist ein glättendes Feinbearbeitungsverfahren für verschiedenste Materialien
Pressen	Verformen von Bauteilen
Pulverbeschichten	Beschichtungsverfahren für elektrisch leitfähige Werkstoffe wie Stahl und Aluminium
Pyrolyse	Thermochemisches Verfahren zur Spaltung organischer Verbindungen ohne Zufuhr von Sauerstoff
Reduzieren	Chemische Reaktion, bei der Elektronen auf einen Werkstoff übertragen werden. Im einfachsten Sinne ist eine Reduktion die Abgabe von Sauerstoff
Reiben	Zerspanendes Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung passgenauer Bohrungen mit hoher Oberflächengüte
Rollen	Herstellung von Gewinden durch Gewinderollen
Schleifen	Spanendes Fertigungsverfahren zum Formen, Schärfen oder Glätten von Oberflächen
Schmieden	Spanloses Druckumformen von Metallen zwischen zwei Werkzeugen mit gezielter Veränderung des Gefüges
Schneiden	Trennendes Fertigungsverfahren mittels Schneidwerkzeugen ohne Spanbildung
Schrauben	Herstellung einer lösbaren Verbindung zwischen Bauteilen aller Art
Schweißen	Das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffen
Sintern	Verfahren zur Herstellung von Werkstoffen durch Erhitzen von pulverförmigen Ausgangswerkstoffen, meist unter Druck
Sonstige	Sonstige Verfahren, die keiner anderen Gruppe zugeordnet sind
Spritzguss	Urformverfahren, hauptsächlich für Kunststoffe, bei der der plastifizierte Werkstoff in den formgebenden Hohlraum eines Werkzeugs eingespritzt wird
Spulen wickeln	Verfahren zur Herstellung von elektromagnetischen Spulen für Elektromotoren
Stanzen	Formstücke aus dünnem Werkstoff (Blech, Pappe, Textilien) auf der Presse mit besonderem Schnittwerkzeug herausschneiden
Stapeln	Aufschichten von einzelnen Komponenten und Vorbereitung zur Verbindung
Strangpressen	Umformverfahren zur Herstellung stabförmiger Profile durch Drücken eines Rohlings durch eine Matrize
Suspensionspolymerisation	Verfahren zur Herstellung von Kunststoffen
Tempern	Das Erhitzen eines Materials über einen längeren Zeitraum mit dem Ziel, entweder die Struktur zu verändern oder mechanische Spannungen zu kontrollieren.
Tiefziehen	Zugdruckumformverfahren für Bleche zur Erzeugung von offenen Hohlkörpern
Trocknen	Entzug von Flüssigkeiten aus einem Stoff oder Gegenstand durch Verdunstung, Verdampfung, den Einsatz von Trocknungsmitteln oder anderen technischen wie chemischen Anwendungen
Verdrahten	Verbinden von elektrischen Elementen durch metallische, meist kupferbasierte Drähte zur Stromführung
Vergießen	Einbringen von Vergussmasse zur Stabilisierung und Isolierung von elektrischen Komponenten
Verpressen	Mechanische Verbindungstechnik bei der zwei Bauteile durch teilweise oder vollständige Plastifizierung eines Fügepartners verbunden werden
Vulkanisieren	chemisch-technisches Verfahren, bei dem kautschukbasierte Werkstoffe unter Einfluss von Zeit, Temperatur und Druck widerstandsfähig gemacht werden
Walzen	Umformverfahren bei dem meist metallische Werkstoffe zwischen zwei rotierenden Walzen umgeformt werden
Wuchten	Beseitigung von Unwuchten bei rotierenden Bauteilen
Ziehen	Umformverfahren das insbesondere bei der Herstellung von Rohren eingesetzt wird

## Übersicht der Expertenworkshops



## Flyer der Expertenworkshops



### Expertenworkshops zum Forschungsbedarf

Bedeutung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte für die Automobil- und Zulieferindustrie

Herbst 2010



### Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 13 Standorten Köln (Sitz des Vorstandes), Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Göttingen, Hamburg, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 6.500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris und Washington D.C.



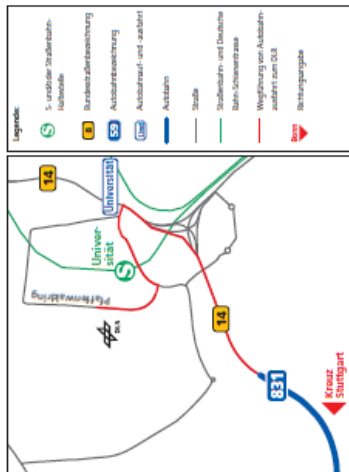
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

**Institut für Fahrzeugkonzepte**  
DLR Stuttgart  
Pfaifenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart

Telefon: 0711 6862-256  
Telefax: 0711 6862-258

[www.dlr.de/fk](http://www.dlr.de/fk)

### Anfahrtsbeschreibung zum DLR Stuttgart



Der DLR-Standort Stuttgart liegt auf dem Gelände der Universität in Stuttgart-Vaihingen am südlichen Rand von Stuttgart. Er ist wie folgt zu erreichen:

**Mit der Bahn:** Vom Hauptbahnhof Stuttgart (ICE-Station) mit der S-Bahn (Linie S1, S2 oder S3) in Richtung Herrenberg, Filderstadt oder Flughafen/Messe bis zur Haltestelle „Universität“, dann der DLR-Beschilderung folgen; circa zehn Minuten Fußweg bis zum Standort.

**Mit dem Auto:** Von der A8 aus Richtung München/Um oder Karlsruhe bzw. von der A81 aus Richtung Heilbronn oder Singen am Autobahnkreuz Stuttgart-Austritt in Richtung Stuttgart Zentrum/Stadtmitte. Dann die dritte Ausfahrt in Richtung Universität. Nach der Ausfahrt an der großen Ampelkreuzung nach links über die Brücke bis zum Pfaifenwaldring (erste Abzweigung rechts). Das DLR befindet sich nach circa 1500 Metern auf der rechten Seite. Parkmöglichkeiten vor der Schranke.

Workshops AELFA.dlr/2010

## Herausforderungen für die Automobilindustrie

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) veranstaltet in Zusammenarbeit mit seinen Partnern, der Universität Stuttgart, des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) vier Expertenworkshops zum Thema „Zukunft elektrifizierter Fahrzeugkonzepte“. Ziel dieser Workshops ist es, mit Experten aus der Automobil- und Zulieferindustrie den Forschungsbedarf für zukünftige Produkte und Fertigungstechnologien zu diskutieren und Impulse für weiterführende Entwicklungen zu liefern, von denen alle Beteiligten profitieren können.

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugen sollen neue und weiterentwickelte Komponenten zukünftiger Fahrzeugkonzepte identifiziert und die damit verbundenen Herausforderungen für Bauweisen-, Werkstoff-, Fertigungstechnologien und Kompetenzen dokumentiert werden. Ausgangspunkte bilden Fachvorträge der Forschungseinrichtungen zum Stand-des-Wissens, Trends und Fragestellungen.

Die voneinander unabhängigen Experten-Workshops sind in vier Themengebiete unterteilt. Die Workshops 1, 2 und 3 sind in je zwei inhaltlich aufeinander aufbauende Veranstaltungen aufgeteilt. Workshop 4 findet an einem Termin statt.

Die Veranstaltungen finden im Auftrag des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, gefördert mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung, statt. Die Ergebnisse werden im Anschluss allen Teilnehmern zur Verfügung gestellt.



## Vernetzen Sie sich mit Forschungseinrichtungen

### Workshop 1: „Fahrzeugkonzepte und Markt“

#### Themenstellungen:

- Einflussfaktoren auf und Rahmenbedingungen für Fahrzeugkonzepte
- Mobilitätskonzepte
- Kostenentwicklungen
- Zukünftige Marktentwicklungen

#### Termine:

Freitag, 17. September 2010, 9:00 - 12:30 Uhr  
 Donnerstag, 7. Oktober 2010, 13:30 - 17:30 Uhr

### Workshop 2: „Komponenten elektrifizierter Antriebe“

#### Themenstellungen:

- Problemstellungen (EREV, BEV, FCV, Hybride)
- Elektrische Maschinen und Antriebsstrang
- Batterietechnologien
- Brennstoffzellen und H<sub>2</sub>-Speicher

#### Termine:

Mittwoch, 22. September 2010, 14:00 - 17:30 Uhr  
 Donnerstag, 14. Oktober 2010, 13:30 - 17:30 Uhr

## Finden Sie heraus, wie Sie sich positionieren können

### Workshop 3: „Fahrzeugbauweisen und Elektrifizierung“

#### Themenstellungen:

- Anforderungen an elektrifizierte Fahrzeugkonzepte
- Leichtbau
- Änderung des Bauteilspektrums
- „Conversion Design“ vs. „Purpose Design“
- Könnliche Multi-Material-Bauweisen

#### Termine:

Freitag, 22. Oktober 2010, 9:00 - 12:30 Uhr  
 Mittwoch, 10. November 2010, 13:30 - 17:30 Uhr

### Workshop 4: „Klimatisierung bei elektrifizierten Antrieben“

#### Themenstellungen:

- Lösungsansätze für Klimatisierungstechnologien
- Möglichkeiten zur Verringerung des Klimatisierungsbedarfs
- Wärmespeicher
- Kältemittel

#### Termin:

Mittwoch, 8. Dezember 2010, 13:30 - 17:30 Uhr

Der Kostenbeitrag beträgt €50 pro Person und Themengebiet. Bitte überweisen Sie den Betrag vor Beginn der jeweiligen Workshops auf das Konto „DLR e.V.“, Kontonummer 500 1169 00, BLZ 370 400 44, Commerzbank Köln, Stichwort „Workshop 3004311“.



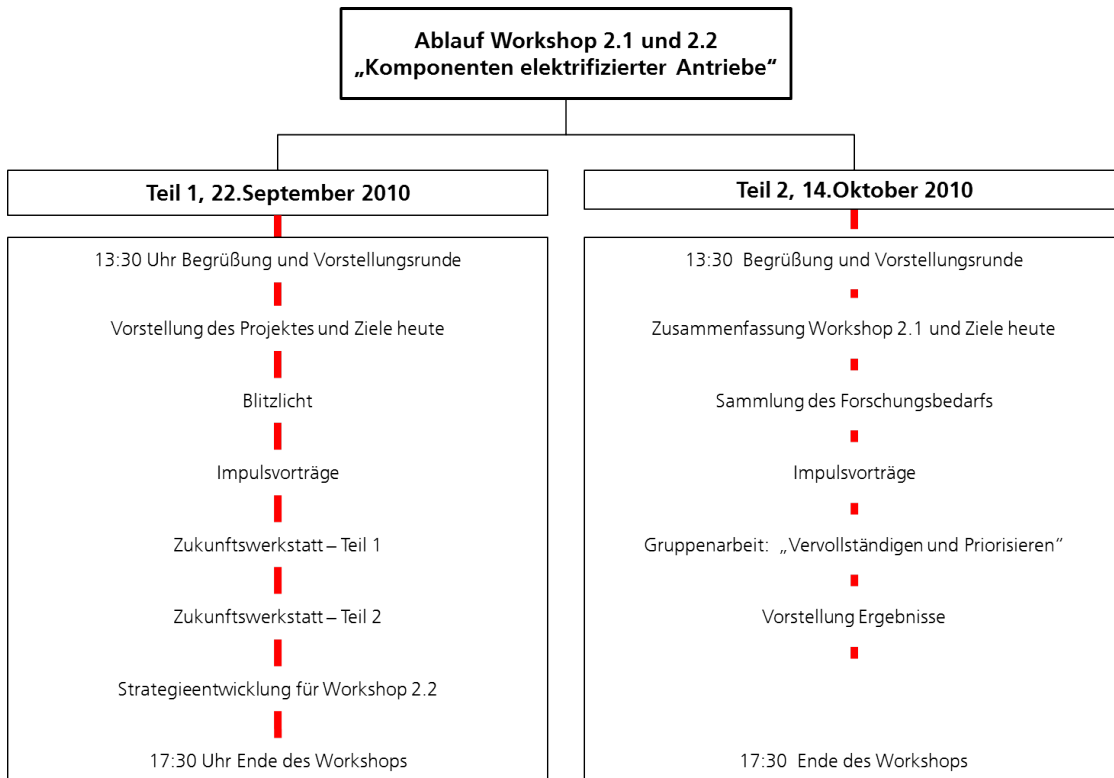
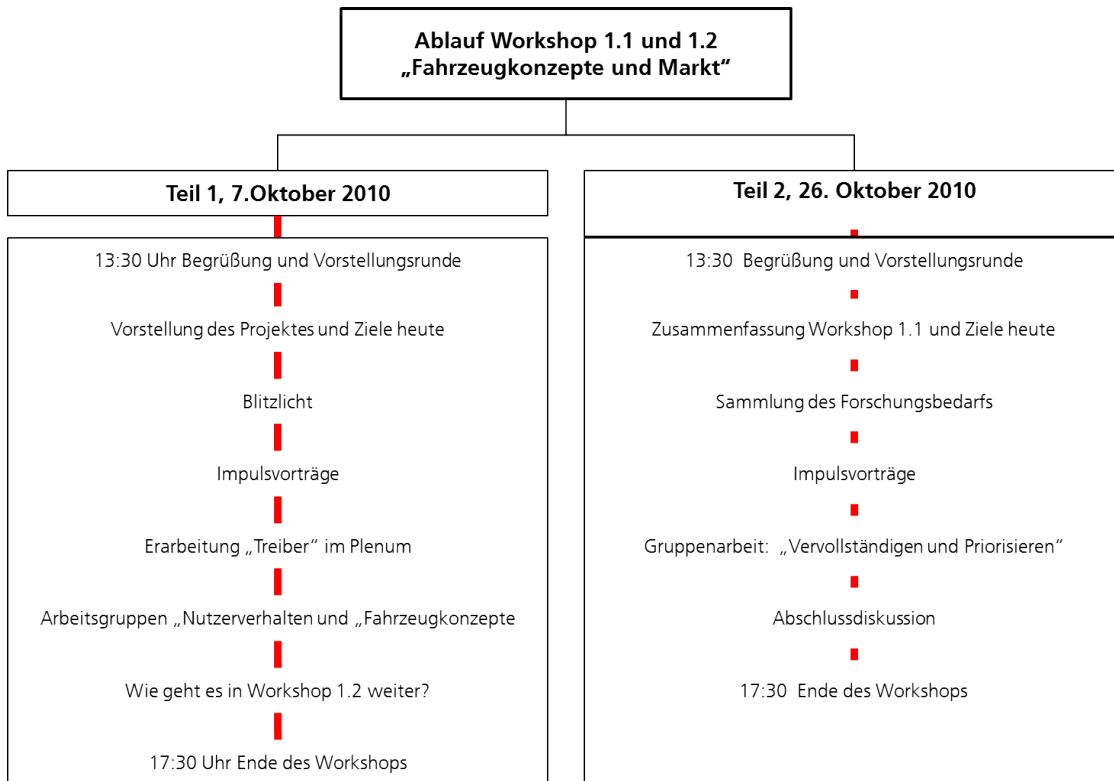
Baden-Württemberg

WIRTSCHAFTSministerium

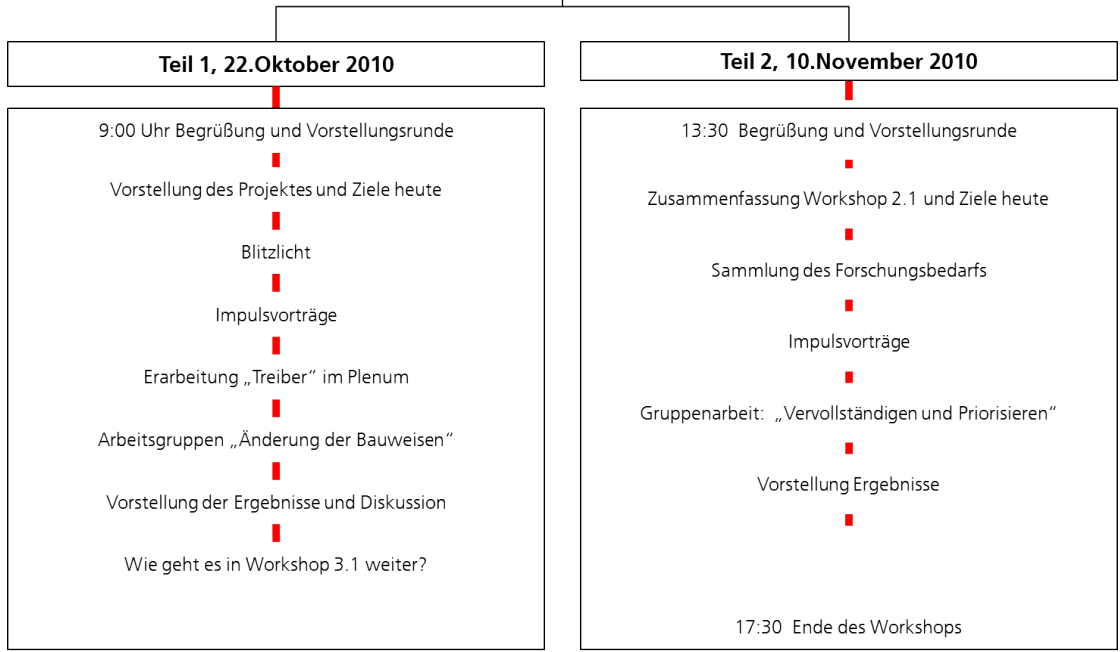




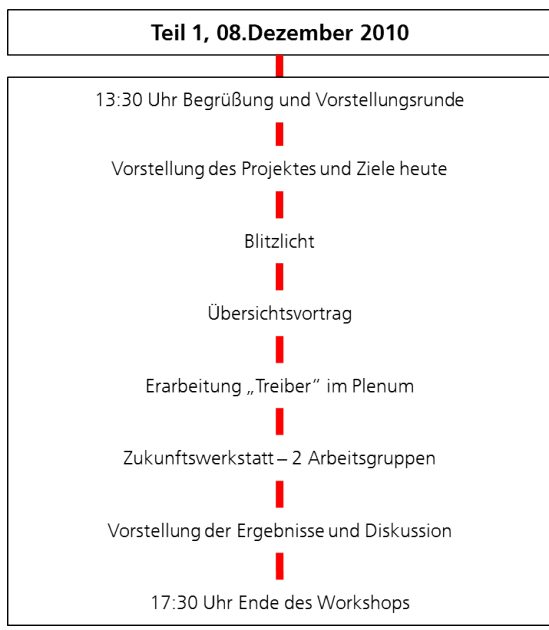
## Ergebnisse der Expertenworkshops



**Ablauf Workshop 3.1 und 3.2  
„Fahrzeugbauweisen und Elektrifizierung“**

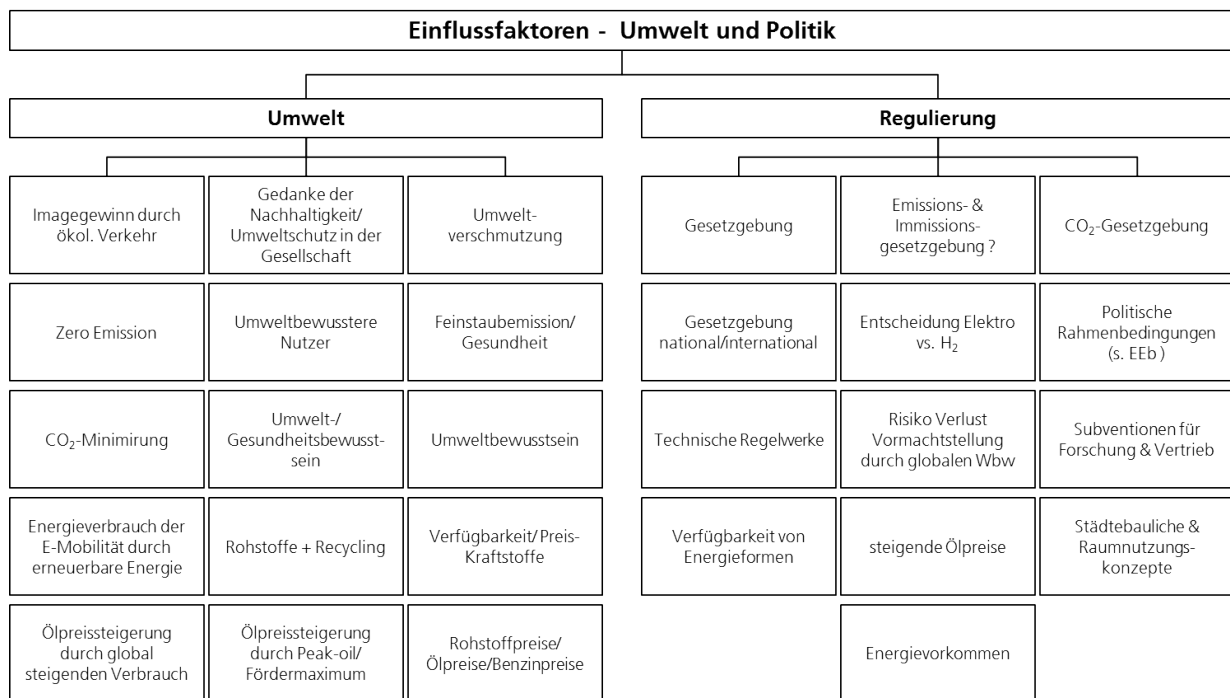
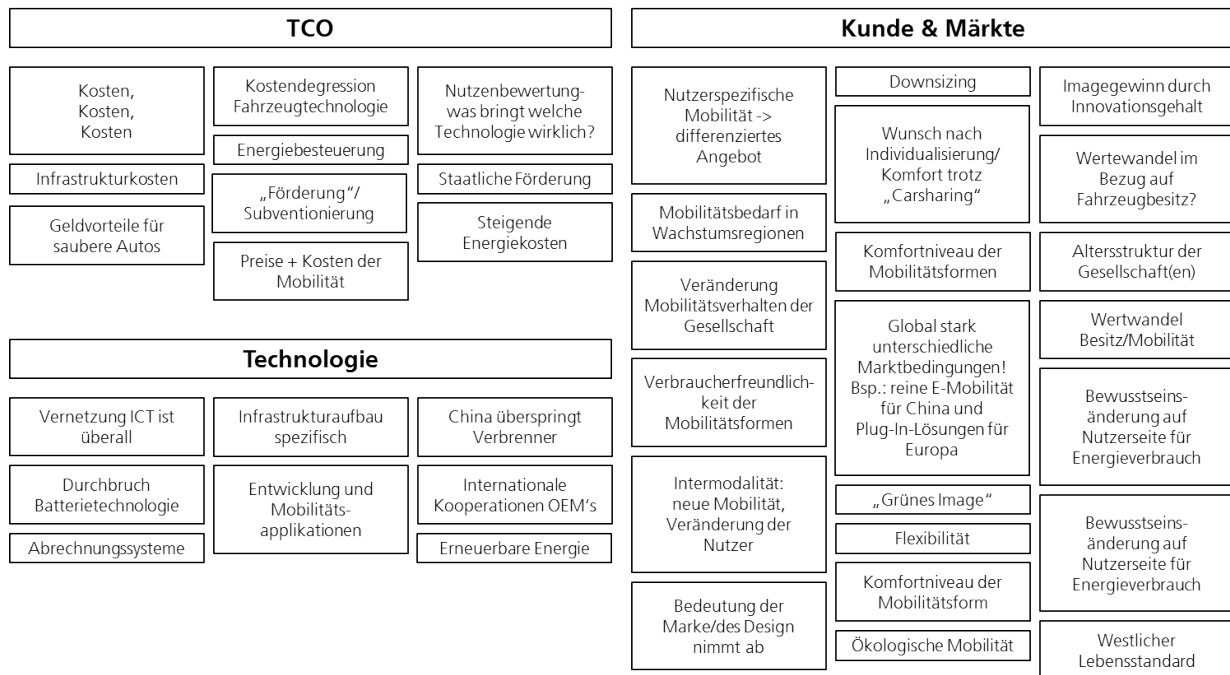


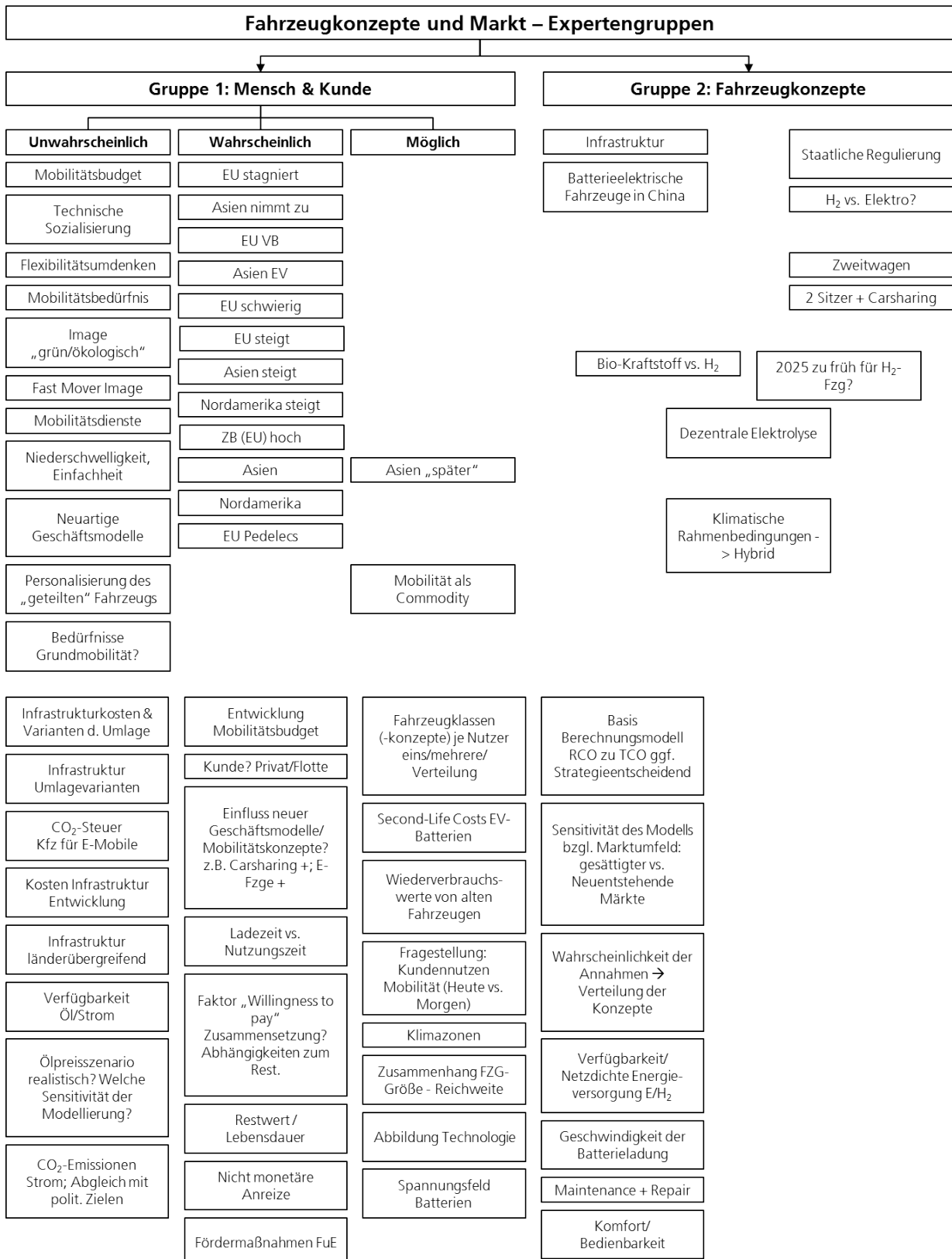
**Ablauf Workshop 4  
„Klimatisierung bei elektrifizierten  
Antrieben“**



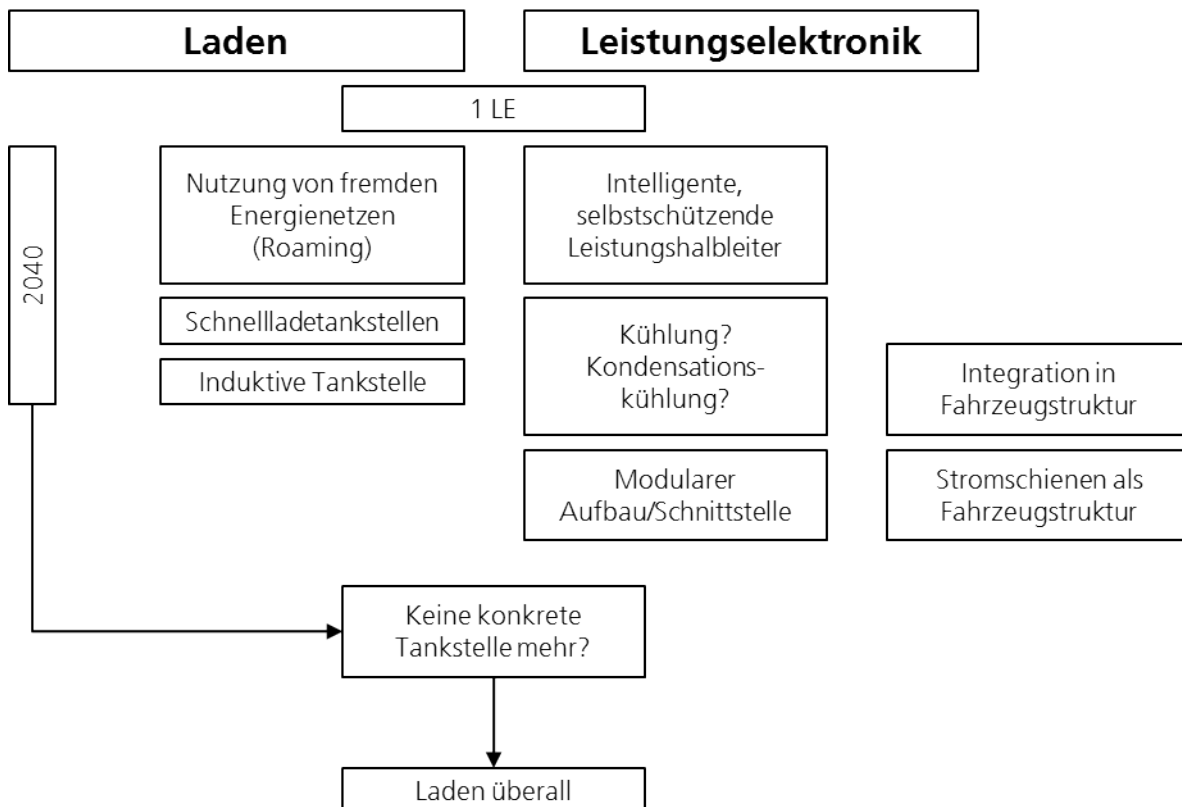
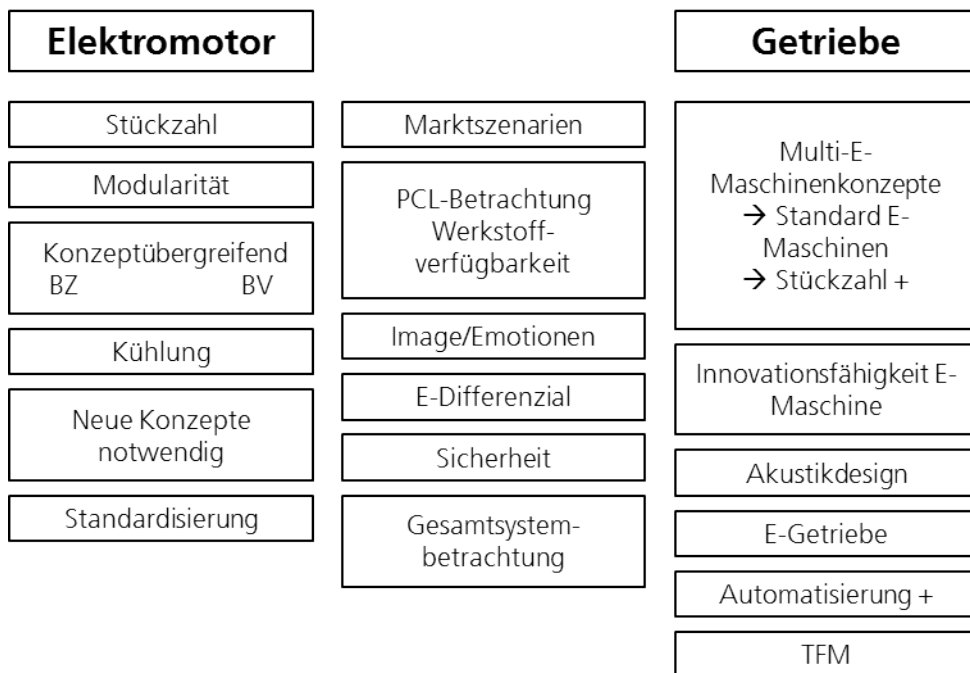


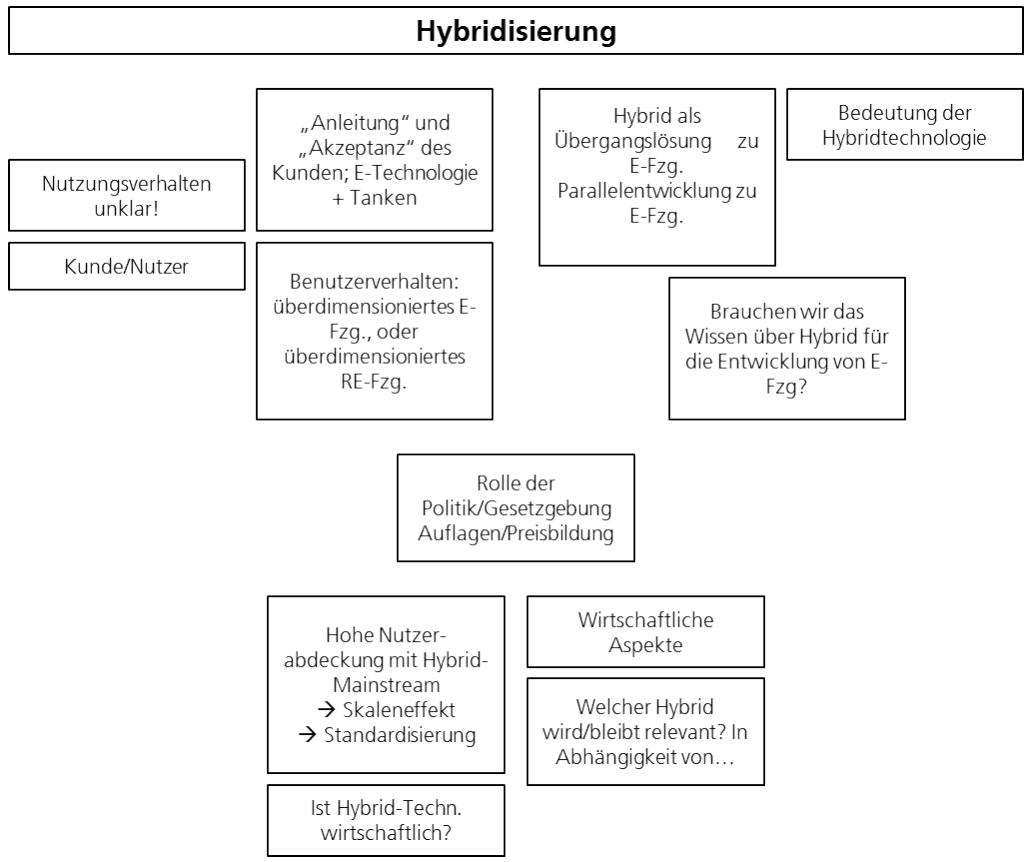
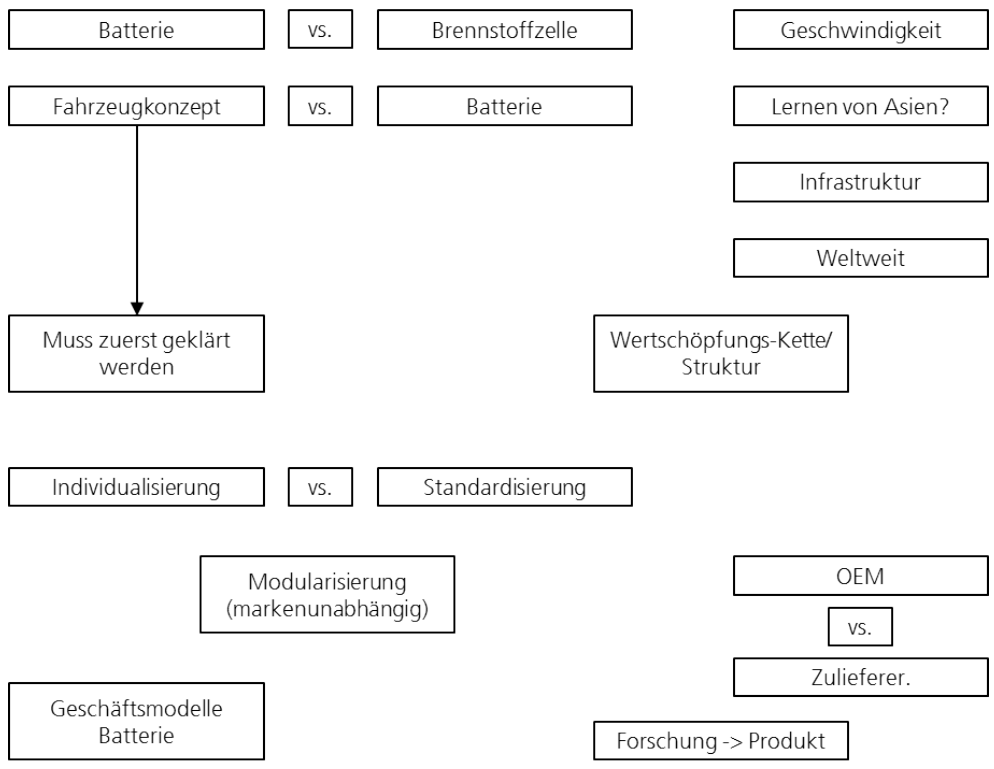
Workshop 1





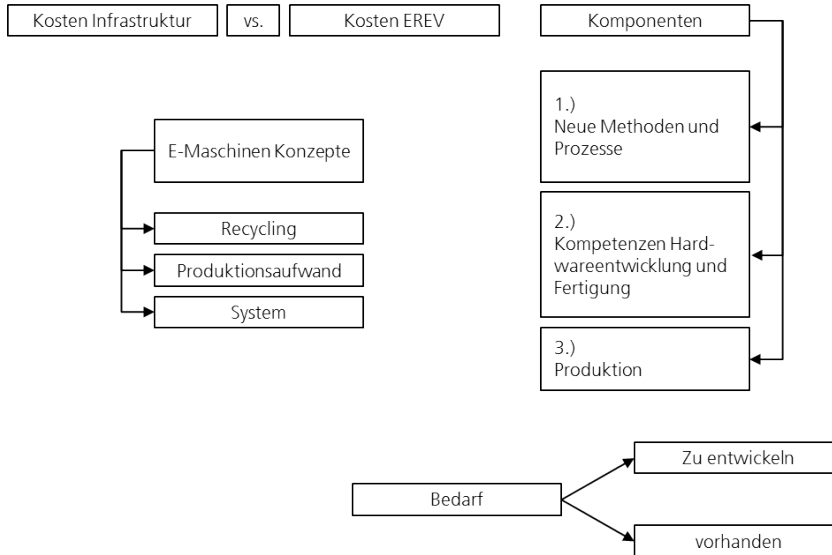
Workshop 2





**Hybridisierung**

Nutzeranforderungen?  
→ Workshop 1

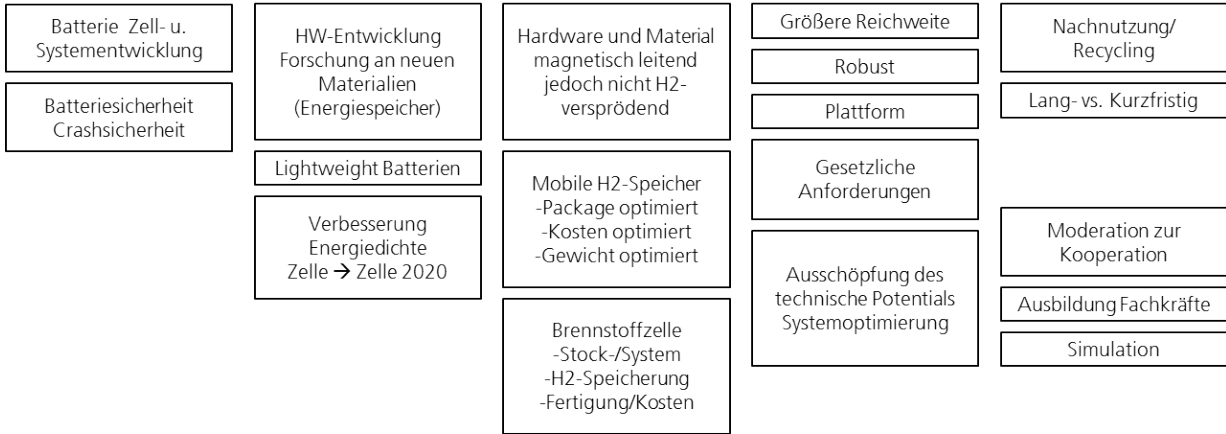


Fertigung & Produktion		Verfahren & Methoden			
Fertigung und Produktion Zusammenführen heute eigenständiger Produktionsbereiche, z.B. Mechanik + Elektronik	Kupfer-Druckguss für ASM	Zusammenarbeit PE + Produktion z.B. durchgängige Modellierung	Ganzheitliche Betrachtung des Antriebsstranges hinsichtlich (Stadt, Land)	Fügeverfahren unterschiedlicher Werkstoffe: Alu-Legierungen und Alu-Kupferverbindungen	Forschung zu Methoden, die eine Vernetzung/ Zusammenarbeit zw. Kunden, Industrie & Forschung begünstigen. „BMBF macht Open Innovation“
Alu-Cu-Leiter Herstellung	Modularisierung E-Antrieb	Komfort/ Nutzerverkehr E-Fahrzeuge (Hybrid)	Neue E-Maschinen: Berechnung, Simulation, Konstruktion, Fertigung, Regelung	Nutzwerkanalyse Hybridisierung (Konzepte)	Wie können sich Kunden, Industrien u Forschung auf Standard einigen?
Entwicklung neuer Fertigungs- und Fügetechnologien für E-Maschinen	Entwicklung von großserientauglichen Fertigungsprozessen für BZ- und H <sub>2</sub> -Speicher-Komponenten	Batterie Fertigung → Prozesskosten → Aufbau Massenproduktion	Qualifikation: Verstehen von Verhaltensmustern im Kontext zukünftiger Mobilität	Entwicklungszielgrößen für Komponenten; Spezifikation Zykluszeit; z.B. Akustik	Welche Anforderungen (Normen) Komponenten (z.B. E-Maschine zu erfüllen haben und wie werden diese überprüft (Wirkungsgrad) → TÜV?
Fertigung + Produktion recyclebarer Werkstoffe	Qualitätsstandards Fertigung Li-Ion-Batterie	TÜV?	E-Maschine + Getriebe? Schaltstrategien?	Sichere Verbindung zwischen Komponenten	Detailliertes Simulationstool
Ziel: Einfache Antriebsystemauslegung Schlagwort: „Komponenten aus BW passen zusammen“	Arbeitskreis v. OEM's unter Einbezug der Systemlieferanten zur Standardisierung von Basis-Komponenten Ziel: Fertigungskostenoptimierung	Bewegung (Rad) → Methode → Aktor	Betriebsstrategie Thermo-E-Management	Simulation + Virtual Prototyp für E-Fzg + Hybrid	
		Methoden für ganzheitliche Systembetrachtung Wechselwirkung	HW-Entwicklung → intelligente Konzepte von Energiespeichern (z.B. Batterie + U-Cap + Brennstoffzelle)	Simulation + Virtual Prototyp für E-Fzg + Hybrid	
		Methoden u. Prozesse: Modularisierungskonzepte		Weiterentwicklung innovativer Metallumformverfahren wie z.B. HERTforming	
		Methoden u. Prozesse Schnellladung Batterie		Vereinfachtes Thermomanagement	

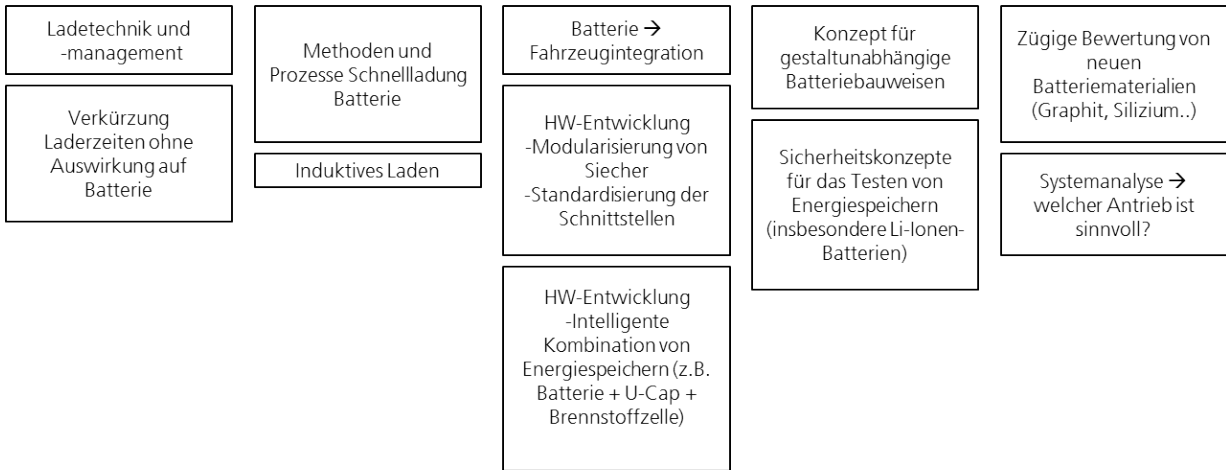
<b>Komponenten</b>			
Verbesserung Energiedichte Zelle → Zelle 2020	Applikationen in Thermomanagement Kühlsysteme, Hybridwerkstoffe, Wärmetauscher	Welchen Innovationserfolg haben wir heute bei welcher Komponente bereits erreicht und welches Potential für Innovationen ist noch vorhanden?	Gemeinsame Plattformen
E-Motoren → frei von seltenen Erden → Radnabenmotoren	el-Erregung		Neue Fahrzeugkonzepte
Hardware: (Motoren Hochintegrierte Komponenten)	Batterie → Fahrzeugintegration	HW-Entwicklung Forschung an neuen Materialien (Energiespeicher)	Vereinfachung des Antriebsrades durch 1 Antriebsrad in Fahrzeugmitte
Batterie Zell- und Systementwicklung	Weiterentwicklung E-Differential „Integration“	Hochfrequente Bauelemente	Fahrzeug Gesamtkonzept Schnittstellen-Komponenten
Kühlung	Wie kann Wirkung für Antriebstrang verbessert werden? Optimale Betriebspunkte	Funktionsintegration Antrieb	Kühlung ← → Wärme
Lightweight Batterien	Bidirektionale Ladegeräte	Radinterne Antriebe	Robust
Konzept für Gestaltunabhängige Batteriebauweisen	Brennstoffzelle: Stock-/System, H2-Speicherung, Fertigung/Kosten	Verkürzung Laderzeiten	Recycling-Konzepte für E-Fahrzeuge
E-Maschinen ohne Wasserkühlung	Neue Lagerkonzepte durch neue Anforderungen	Kostengünstige Darstellung Leitung Elektronik+ E-Maschine	Batteriesicherheit Crashesicherheit
HW-Entwicklung: Modularisierung von Speichern, Standardisierung der Schnittstellen	Energiesparende Konzepte für Heizung & Klima im E-Fzg.	Service und Wartung?	Integration E-Maschine-BMS-Batterie
Hardware und Material magnetisch leitend, jedoch nicht H2-versprödet		Möglich: Infrastruktur E-Komponenten	Sicherheitskonzepte für das Testen von Energiespeichern (insbesondere Li-Ionen-Batterien)
Hardware und Material magnetisch leitend, jedoch nicht H2-versprödet		Weiterentwicklung (Herstellungsprozess)	Forschungsbedarf: Anforderungen durch hochdrehende E-Maschinen und Momente an den Antriebstrang
		Mobile H2-Speicher: Package optimiert, Kosten optimiert, Gewicht optimiert	

**Batterie/Laden - Brennstoffzellen/H<sub>2</sub>**

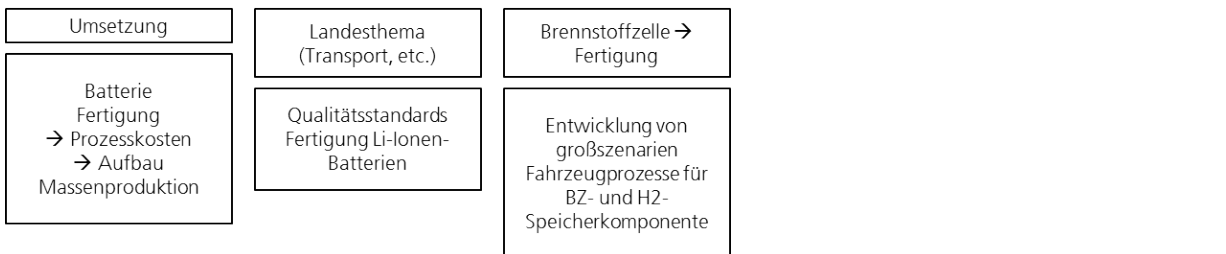
**Hardware-Entwicklung**



**Methoden & Prozesse**



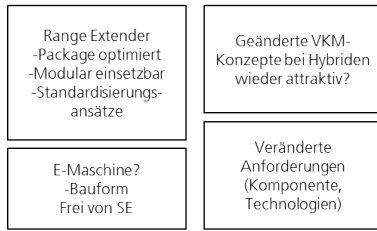
**Fertigung und Produktion**



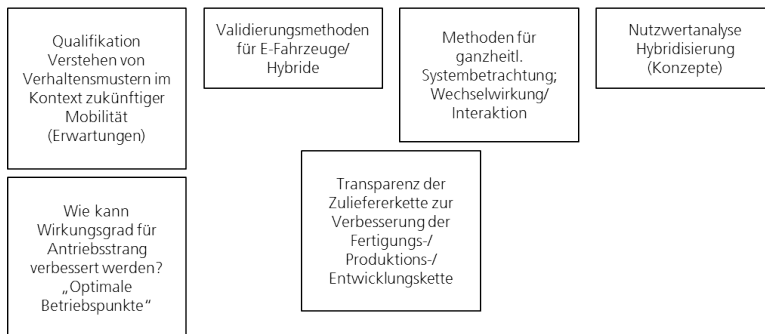


**Hybridisierung**

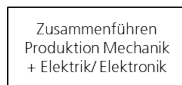
**Hardware-Entwicklung**



**Methoden & Prozesse**

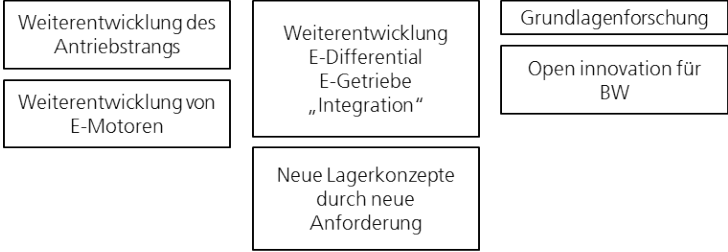


**Fertigung und Produktion**

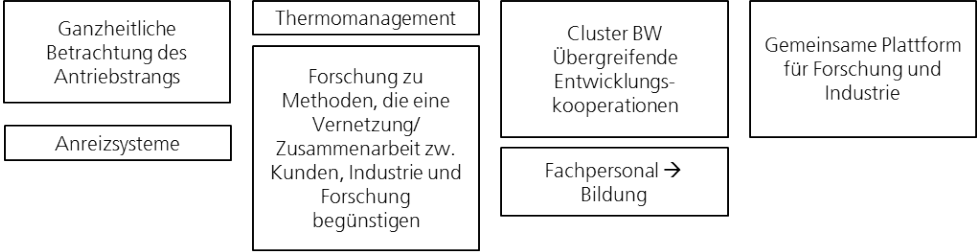


**Motor, Getriebe, Leistungselektronik**

**Hardware-Entwicklung**



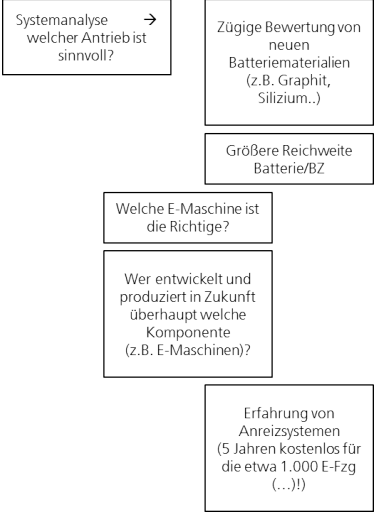
**Methoden & Prozesse**

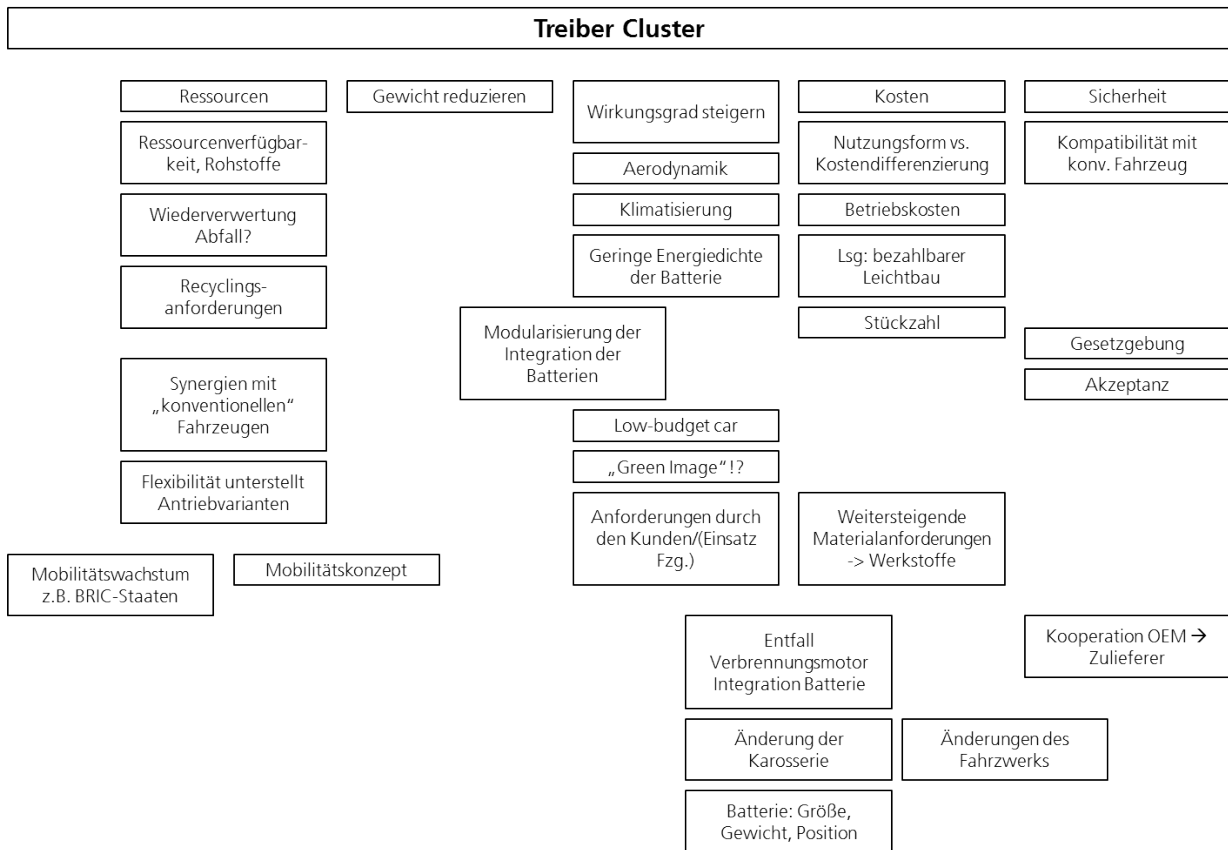


**Fertigung und Produktion**

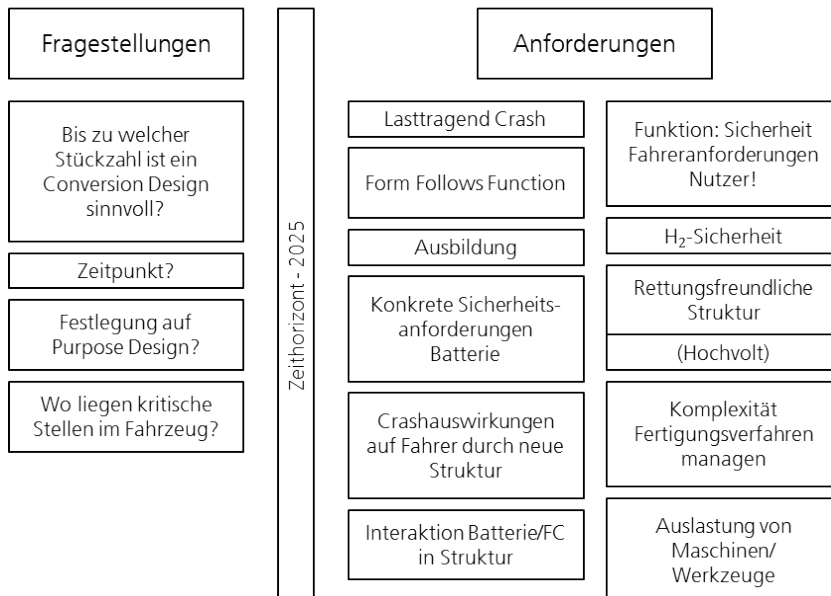
Aufbau von Automatisierungstechnik für die Serienfertigung von E-Motoren

**Foresight  
Technologie Monitoring**

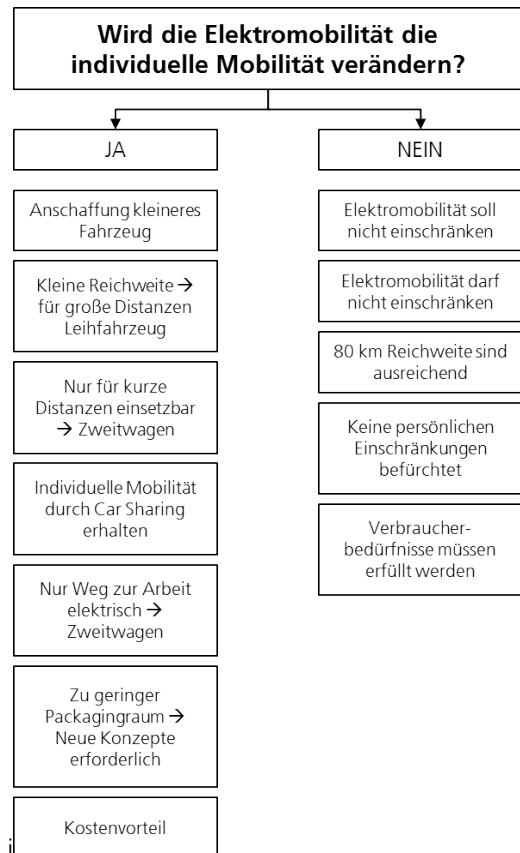
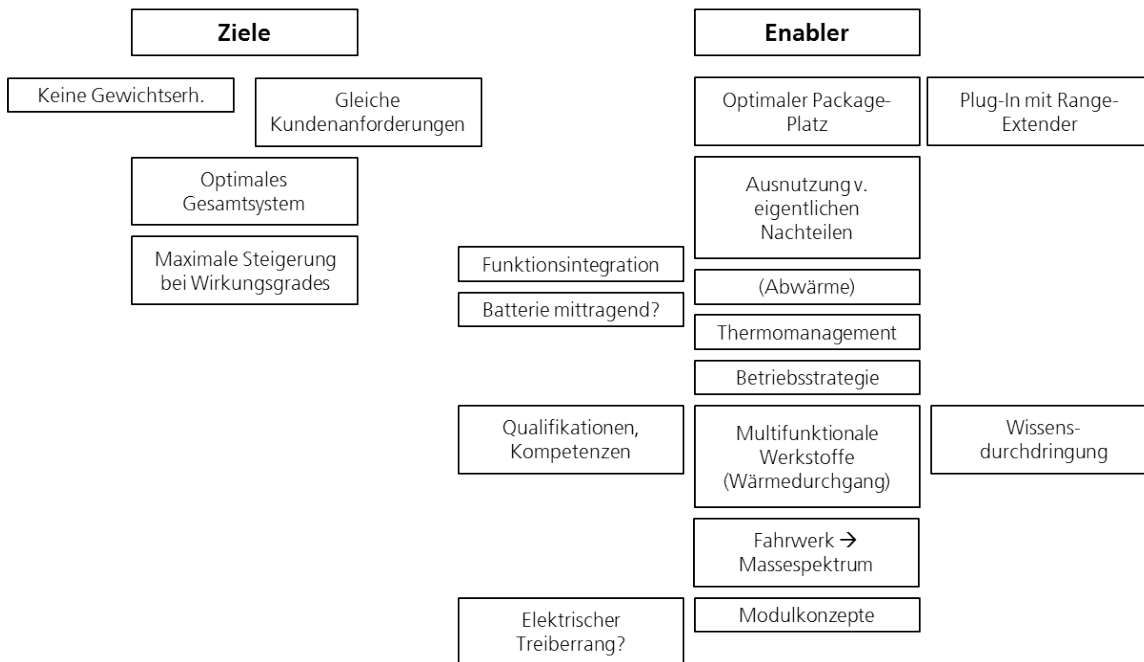




### Herausforderungen batterieelektrischer oder brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge



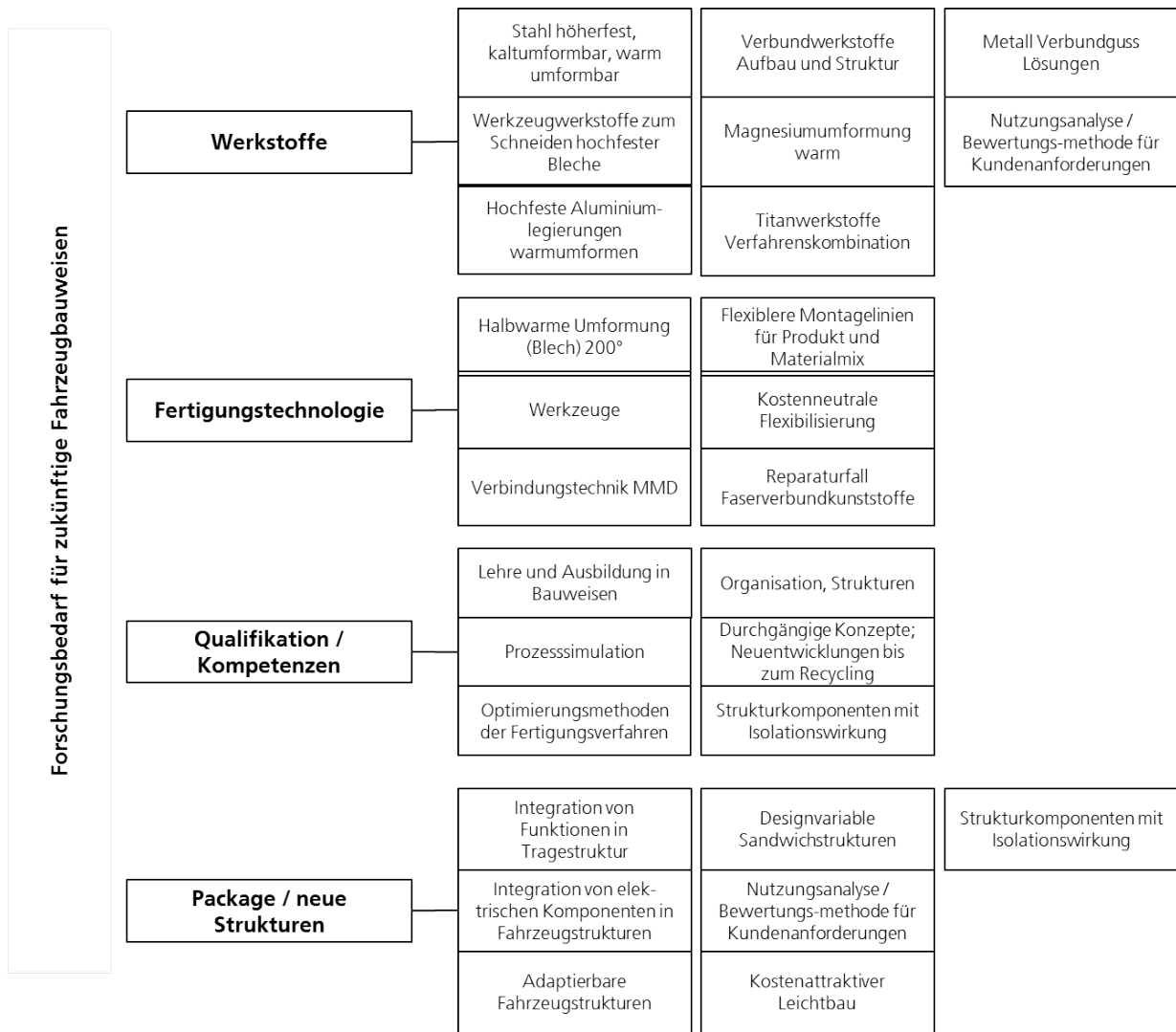
**Gruppenarbeit Hybridkonzepte**

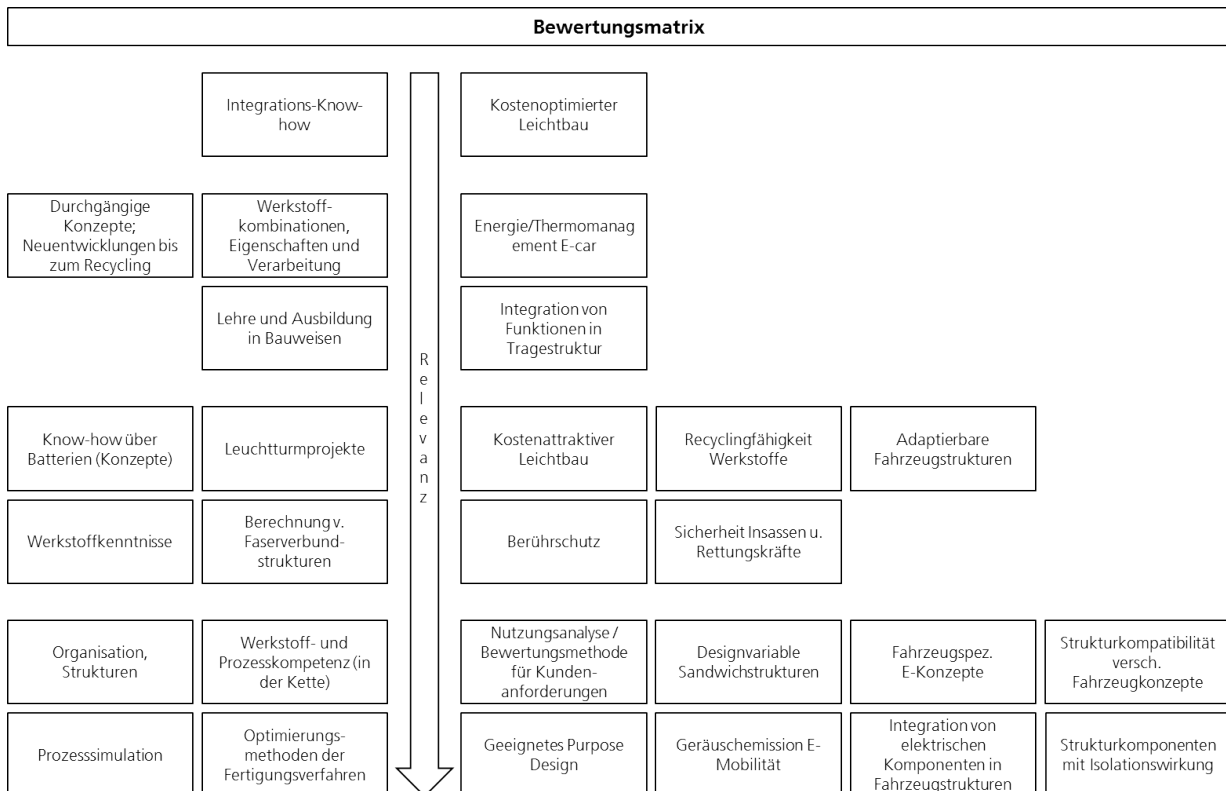
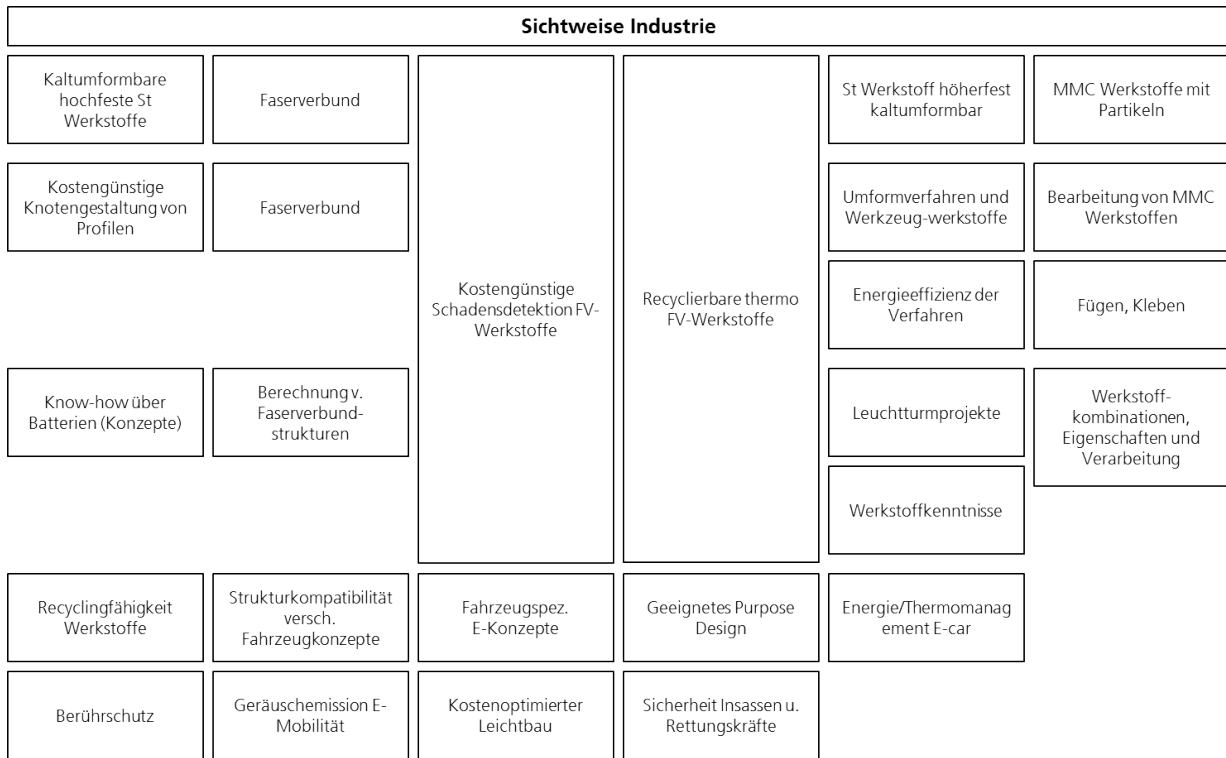


### Workshop 3

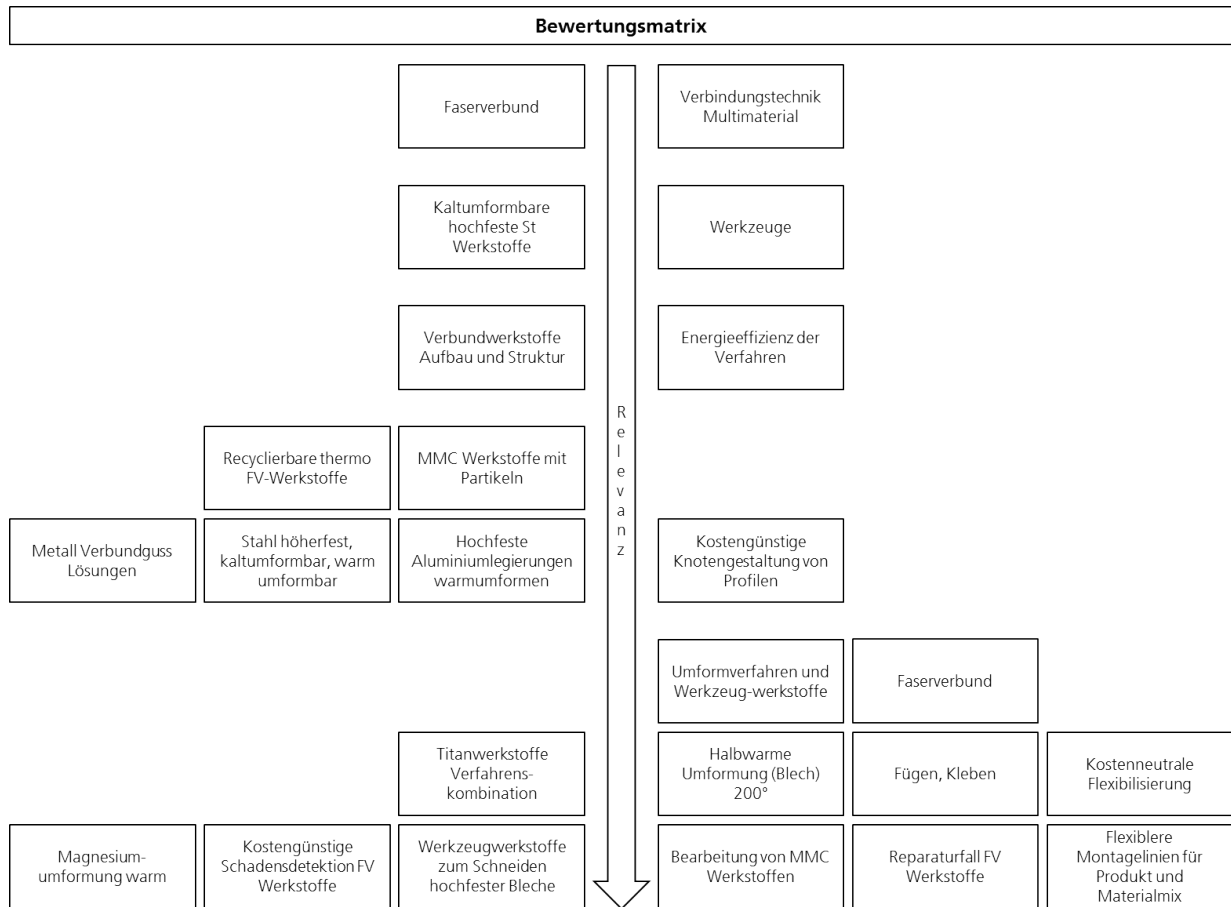


Sichtweise Forschung			
Stahl höherfest, kaltumformbar, warm umformbar	Verbundwerkstoffe Aufbau und Struktur	Metall Verbundguss Lösungen	Strukturkomponenten mit Isolationswirkung
Werkzeugwerkstoffe zum Schneiden hochfester Bleche	Magnesiumumformung warm		
Hochfeste Aluminiumlegierungen warmumformen	Titanwerkstoffe Verfahrenskombination	Reparaturfall Faserverbundkunststoffe	
Halbwarme Umformung (Blech) 200°	Werkzeuge		
Flexiblere Montagelinien für Produkt und Materialmix	Kostenneutrale Flexibilisierung	Verbindungstechnik Multimaterial	
Integration von Funktionen in Tragestruktur	Integration von elektrischen Komponenten in Fahrzeugstrukturen	Designvariable Sandwichstrukturen	
Kostenattraktiver Leichtbau	Adaptierbare Fahrzeugstrukturen	Nutzungsanalyse / Bewertungsmethode für Kundenanforderungen	
Optimierungsmethoden der Fertigungsverfahren	Organisation, Strukturen		
Durchgängige Konzepte; Neuentwicklungen bis zum Recycling	Lehre und Ausbildung in Bauweisen	Prozesssimulation	

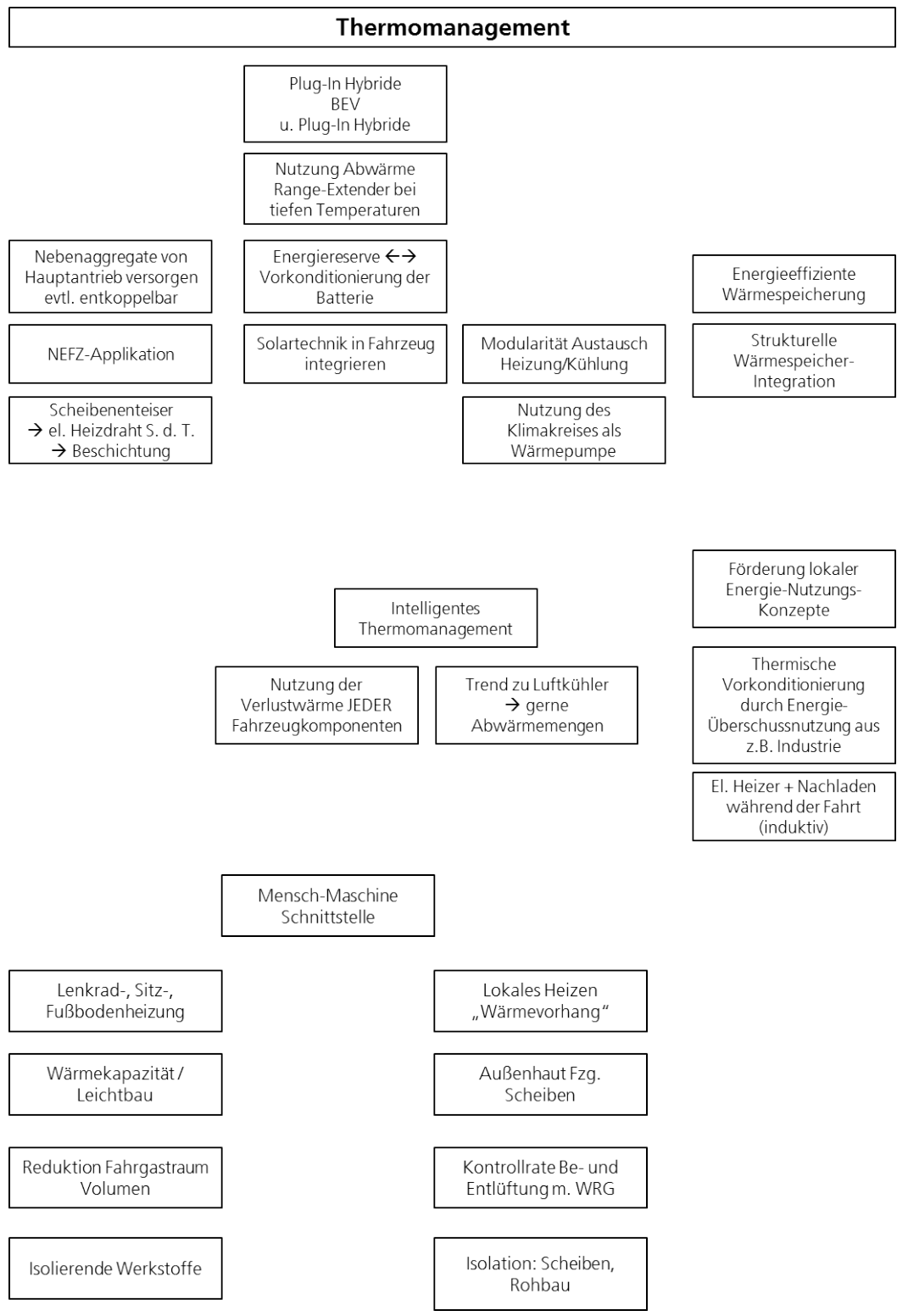




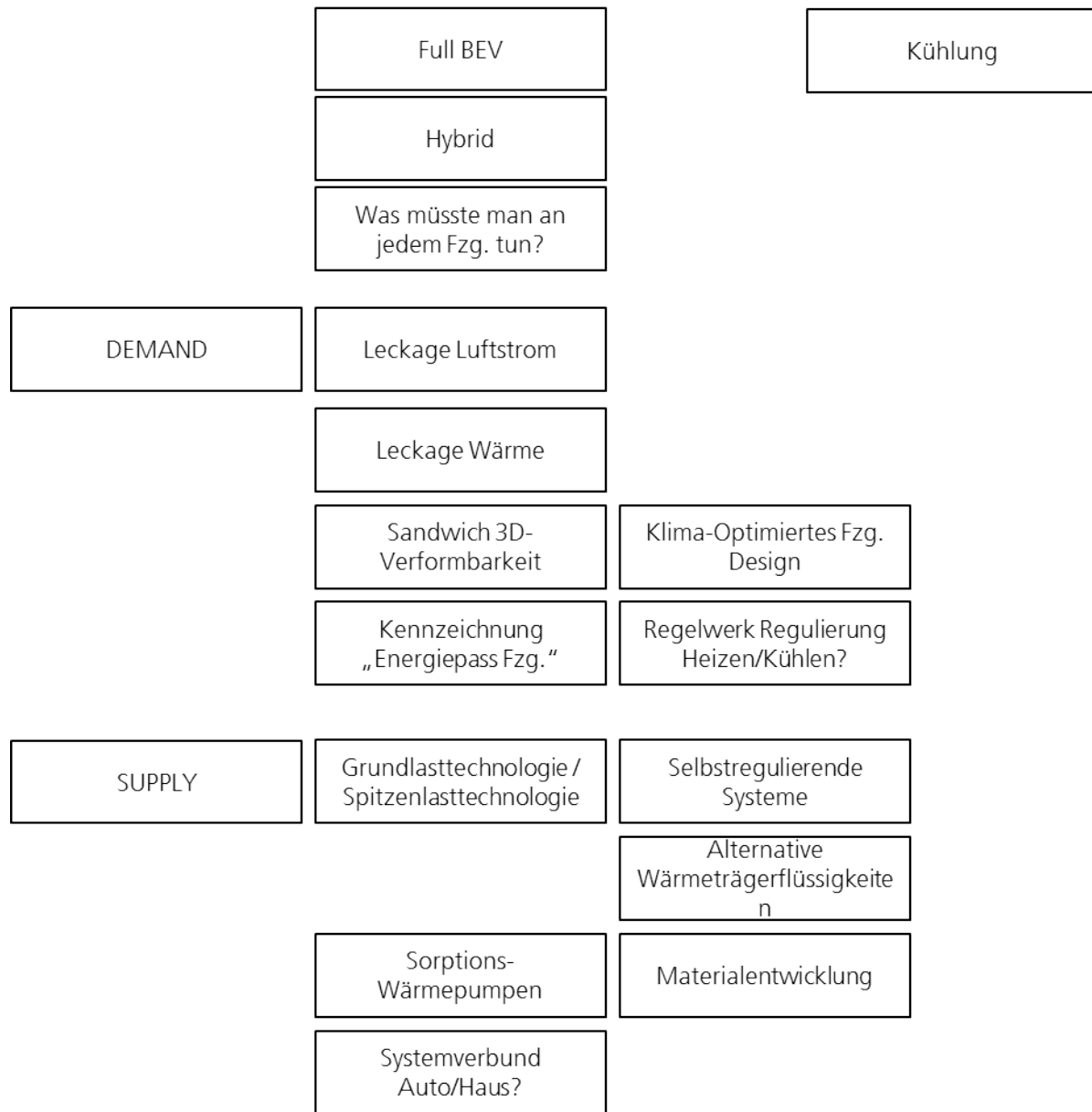


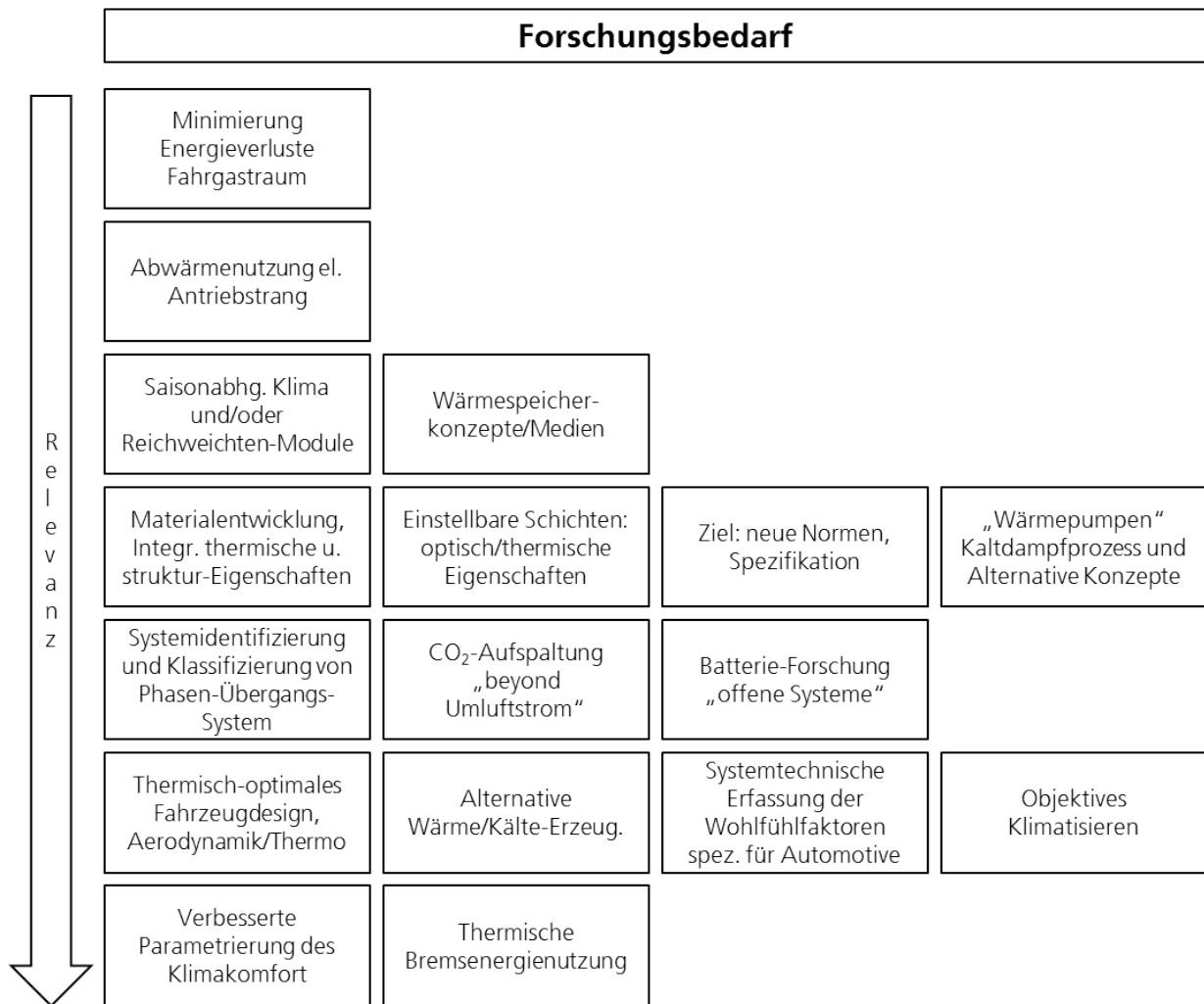


Workshop 4



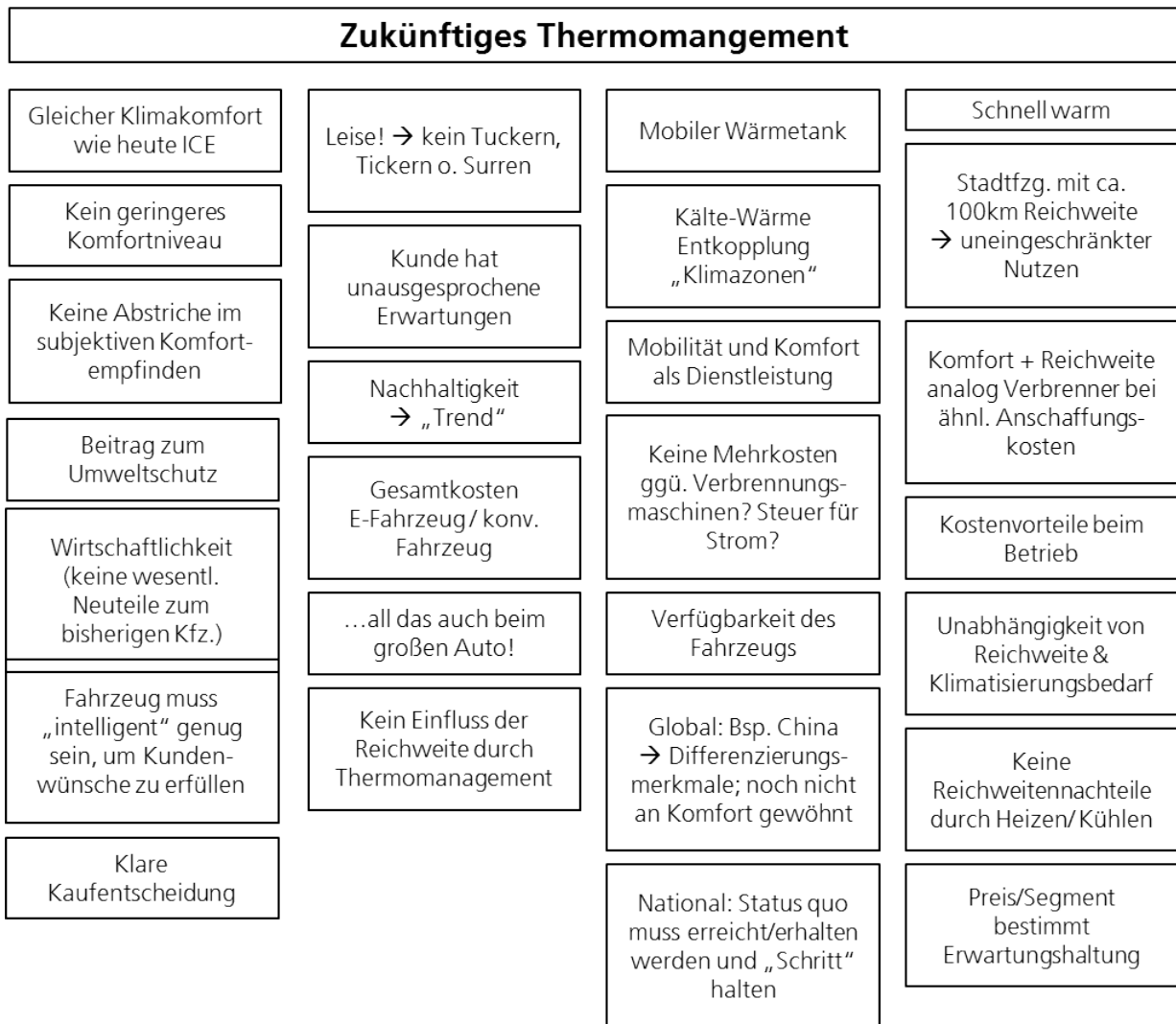
**Thermomanagement**





## Innovative Ansätze Thermomanagement

Wärmepumpe	„Isolierkanne“	Leckage
Was wollen wir heizen?	Vorkonditionierung	Energieträger ohne C
Nutzung aller Wärmeerzg. Elemente	Passivauto	Wärmespeicher entspr. Angebot
Wohlfühlen	Reg. Energie z.B. Bioethanol	Therm. Nutzung Bremsenergie
Dezentrales Heizen	Wärme tanken	El. Zusatzheizung
Hochtemp. Wärmespeicher >100°C	„Fahrzeug warm halten“	Regelwerke
	Energie aus Strömungsdynamik	Personen nicht Umgebung heizen



## IMPRESSUM

**Diese Studie wurde im Auftrag des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln der Baden-Württemberg Stiftung vom Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR durchgeführt.**

### Beteiligte Institute **Experten-Workshops**

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.**

Institut für Fahrzeugkonzepte, FK

**Karlsruhe Institut für Technologie, KIT**

Institut für Produktentwicklung, IPEK

**Universität Stuttgart**

Institut für Leistungselektronik und elektrische Antriebe, ILEA

Institut für Umformtechnik, IFU

**Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung**

**Baden-Württemberg, ZSW**

**Herausgeber** **Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart  
Telefon: 0711 6862 256  
E-Mail: info-st@dlr.de  
www.dlr.de

**Ministerium für  
Finanzen und Wirtschaft  
Baden-Württemberg**

Neues Schloss, Schlossplatz 4  
70173 Stuttgart  
Telefon: 0711 279 0  
E-Mail: poststelle@mfw.bwl.de  
www.mfw.baden-  
wuerttemberg.de  
www.automotive-bw.de

**Autoren der Hauptkapitel** **Kapitel 2:** Dr. Stephan Schmid

**Kapitel 3:** Dr. Michael Schier, Holger Dittus, Thomas Braig, Franz Philipps

**Kapitel 4:** Elmar Beeh, Simon Brückmann

**Kapitel 5:** Max Eschenbach, Thomas Braig

**Kapitel 6:** Bernd Propfe

**Kapitel 7:** Bernd Propfe, Elmar Beeh, Dr. Michael Schier

**Drucklegung** Stuttgart, im Dezember 2011

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung  
nur nach vorheriger Absprache mit den Herausgebern.