

ELEKTROMOBILITÄT UND BESCHÄFTIGUNG

WIRKUNGEN DER ELEKTRIFIZIERUNG DES ANTRIEBSSTRANGS AUF BESCHÄFTIGUNG
UND STANDORTUMGEBUNG (ELAB)



DLR

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

Institut für Fahrzeugkonzepte



IMU Institut



ELEKTROMOBILITÄT UND BESCHÄFTIGUNG

Wirkungen der **E**lektrifizierung des **A**ntriebsstrangs auf **B**eschäftigung und Standortumgebung (ELAB)

Herausgeber: Fraunhofer IAO, DLR-FK, IMU Institut

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Bauer

**Simon Voigt, Daniel Borrmann, Florian Herrmann, Marius Brand, Peter Rally, Florian Rothfuss,
Carolina Sachs**

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart.

Benjamin Frieske, Bernd Propfe, Martin Redelbach, Dr.-Ing. Stephan Schmid

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK) in Stuttgart.

Dr. phil. Jürgen Dispan

IMU Institut in Stuttgart.

Forschungsprojekt

„Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung. Wirkungsanalyse alternativer Antriebskonzepte am Beispiel einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion“

Projektnummer: 2010-376-1

Projektträger: Daimler AG, Hans-Böckler-Stiftung, IG Metall Baden-Württemberg

Impressum

Kontaktadressen:

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970 2124
Telefax 0711 970 2299
E-Mail presse@iao.fraunhofer.de
URL www.iao.fraunhofer.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
Telefon 0711 6862 623
Telefax 0711 6862 258
E-Mail benjamin.frieske@dlr.de
URL www.dlr.de/fk

IMU Institut
Hasenbergstraße 49
70176 Stuttgart
Telefon 0711 23705 24
Telefax 0711 23705 11
E-Mail jdispan@imu-institut.de
URL www.imu-institut.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.
ISBN 978-3-8396-8755-0
Titelbild © Daimler AG

Druck und Weiterverarbeitung:
IRB Mediendienstleistungen
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Gliederung

Gliederung	3
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung und Struktur des Abschlussberichts	11
1.1 Ausgangssituation.....	11
1.2 Zielsetzung von ELAB	12
1.3 Fragestellungen und Vorgehen	12
1.4 Projektstruktur und Projektpartner	13
1.5 Struktur des Abschlussberichtes	14
2 Fahrzeug- und Antriebskonzepte	17
2.1 Übersicht alternativer Antriebskonzepte	17
2.1.1 Hybrid Electric Vehicles (HEV)	18
2.1.2 Battery Electric Vehicles (BEV)	21
2.1.3 Range-extended Electric Vehicles (REX).....	22
2.1.4 Fuel Cell Vehicles (FCV)	23
2.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	23
2.2.1 Verbrennungsmotoren	24
2.2.2 Getriebe	24
2.2.3 Elektrische Maschinen	25
2.2.4 Batterie-Systeme.....	26
2.2.5 Leistungselektronik.....	27
2.2.6 Brennstoffzellen-Systeme	28
2.2.7 Weitere Entwicklungen	28
2.3 Auswahl von Antriebsarchitekturen für die weitere Untersuchung	29
2.4 Explorative Analyse der Bauteilvielfalt	29
2.5 Definition der Referenz-Antriebskonzepte	34
2.5.1 Referenz-Fahrzeug Verbrennungsmotor - ICE	36
2.5.2 Referenz-Fahrzeug Mild-Hybrid – Mild-HEV	37
2.5.3 Referenz-Fahrzeug Full-/ Plug-In-Hybrid – HEV.....	38
2.5.4 Referenz-Fahrzeug Range-extended Electric Vehicle – REX	40
2.5.5 Referenz-Fahrzeug Battery Electric Vehicle – BEV.....	41
2.5.6 Referenz-Fahrzeug Fuel Cell Vehicle – FCV	42
3 Absatzszenarien	43
3.1 Methodik und Vorgehensweise	43
3.2 Ableitung von Szenarien	46
3.2.1 ELAB-Referenzszenario	46
3.2.2 Alternativszenarien	47
4 Produktionsprozesse von Komponenten konventioneller und neuer Antriebsstränge	50
4.1 Einführung und allgemeine Implikationen	50
4.1.1 Begriffliche Abgrenzung und Definitionen	50
4.1.2 Veränderte Anforderungen im Automobilbau	51
4.2 Verbrennungsmotor.....	54
4.2.1 Produkttypologie	54
4.2.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	54
4.2.2.1 Montage der Verbrennungsmotoren	55
4.2.2.2 Herstellung der Hauptkomponenten	56
4.2.2.3 Trends in der Herstellung der Hauptkomponenten	58

4.3	Getriebe.....	59
4.3.1	Produkttypologie.....	59
4.3.2	Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	59
4.3.2.1	Herstellung der Hauptkomponenten	60
4.3.2.2	Trends in der Herstellung der Hauptkomponenten	62
4.4	Elektrische Maschine.....	63
4.4.1	Produkttypologie.....	63
4.4.1.1	Einführung.....	63
4.4.1.2	Motortopologie und Ausführungsformen elektrischer Maschinen	63
4.4.2	Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	65
4.4.2.1	Übersicht und Gesamtbetrachtung.....	65
4.4.2.2	Statorherstellung.....	66
4.4.2.3	Rotorproduktion.....	69
4.4.2.4	Endmontage und -Prüfungen	71
4.5	Traktionsbatterie.....	72
4.5.1	Produkttypologie.....	72
4.5.2	Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	73
4.5.2.1	Übersicht und Gesamtbetrachtung.....	73
4.5.2.2	Erstellung der Zellstacks	74
4.5.2.3	Batteriemodul-Herstellung.....	75
4.5.2.4	Batteriesystem-Montage	76
4.6	Leistungselektronik	79
4.6.1	Produkttypologie.....	79
4.6.2	Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	81
4.6.2.1	Herstellung des Leistungsmoduls.....	82
4.6.2.2	Herstellung des Folienkondensators.....	83
4.6.2.3	Herstellung der Steuerungselektronik	84
4.6.2.4	Gehäuseherstellung und Endmontage des Leistungselektronik- Systems.....	84
4.7	Brennstoffzellensystem und Wasserstoffdrucktank	85
4.7.1	Produkttypologie.....	85
4.7.2	Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien.....	89
4.7.2.1	Membrane Electrode Assembly	90
4.7.2.2	Weitere Komponenten Brennstoffzellen-Stack	95
4.7.2.3	Wasserstoffdrucktank.....	99
4.7.2.4	Brennstoffzellen-System	101
4.8	Abschließende Gesamtbetrachtung der Fertigung der Komponenten des neuen Antriebsstrangs	105
5	Ermittlung Personalbedarf auf Komponentenebene.....	107
5.1	Allgemeines Vorgehen und Methodik	107
5.1.1	Datenermittlung Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs	108
5.1.2	Datenermittlung Komponenten des alternativen Antriebsstrangs	109
5.1.2.1	Extrapolation.....	110
5.1.2.2	Analogiefelder.....	111
5.1.2.3	Zusammenführung und Validierung	111
5.1.3	Interviewpartner	112
5.2	Definitionen	114
5.2.1	Personalbedarf (Bruttobedarf, Nettobedarf).....	114
5.2.2	Beschreibungssprache Mitarbeiter	115
5.2.3	Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	116
5.3	Randbedingungen und Einschränkungen der Datenbasis	119
5.3.1	Datengüte.....	119
5.3.1.1	Datenermittlung allgemein.....	119
5.3.1.2	Extrapolation und Analogie-Betrachtung.....	119
5.3.1.3	Zusammenführung und Optimierung der Zahlen.....	120

5.3.1.4	Aktueller Stand der Technik bei Komponenten und in Produktion	120
5.3.1.5	Abweichungen vom idealtypischen Personalbedarf	120
5.3.2	Berücksichtigung Erfahrungskurveneffekte und Produktkomplexität.....	121
5.3.2.1	Lernkurveneffekte	121
5.3.2.2	Erfahrungskurveneffekte	121
5.3.2.3	Steigerung Produktkomplexität	121
5.3.2.4	Berücksichtigung von Erfahrungskurveneffekt sowie Komplexitätssteigerung	122
5.3.3	Zusammenfassung genereller Einschränkungen und Restriktionen.....	123
5.4	Zusammenfassung Personalbedarf	125
5.4.1	Personalbedarf der Einzelkomponenten.....	125
5.4.2	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	127
6	Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion	128
6.1	Einführung.....	128
6.2	Vorgehen.....	129
6.2.1	Informationspfad 1: Produktionszahlen	130
6.2.2	Informationspfad 2: Empirische Daten	133
6.3	Methodik der Komplexitätsmatrix	138
6.3.1	Herangehensweise	138
6.3.2	Beurteilungskriterien	140
6.3.3	Abweichungen des Personalbedarfs bei den betrachteten Komponenten	141
6.3.3.1	Verbrennungsmotor	141
6.3.3.2	Getriebe.....	142
6.3.3.3	Batteriesystem.....	142
6.3.3.4	Elektrische Maschine	142
6.3.3.5	Leistungselektronik.....	143
6.3.3.6	Brennstoffzellen-System	143
6.3.3.7	H ₂ -Tank.....	143
6.3.4	Zusammenfassung der Analyse-Ergebnisse	144
6.4	Auswertungspfad: Ermittlung des Personalbedarfs.....	145
6.5	Personalbedarf in der Antriebsstrangproduktion	146
6.5.1	Zusammenfassung der getroffenen Annahmen	147
6.5.2	Referenzszenario	148
6.5.2.1	Direkte Mitarbeiter	151
6.5.2.2	Indirekte Mitarbeiter.....	151
6.5.2.3	Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter.....	152
6.5.3	BEV-Szenario	152
6.5.4	FCV-Szenario.....	153
6.5.5	ICE-Szenario	154
6.5.6	Vergleich der Szenarios	155
6.6	Nicht-idealtypische Antriebsstrangproduktion	156
6.6.1	Annahmenkomplexe	156
6.6.1.1	Annahmenkomplex „Neue Komponenten“	156
6.6.1.2	Annahmenkomplex „Alte Komponenten“	157
6.6.1.3	Annahmenkomplex „Stop-Loss“	158
6.6.2	Extremfälle	158
6.6.2.1	ICE-Extrem	159
6.6.2.2	Mild-Extrem	159
6.6.2.3	HEV-Extrem	160
6.6.2.4	REX-Extrem	161
6.6.2.5	BEV-Extrem	162
6.6.2.6	FCV-Extrem	163

7	Kompetenzanforderungen und Qualifikationen	164
7.1	Vorgehensweise.....	164
7.2	Kompetenzanforderungen im Wandel	165
7.2.1	Vorbemerkung: Entwicklungstrends der Industriearbeit	165
7.2.2	Veränderungen durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs.....	167
7.2.3	Bedeutungszunahme Elektronik	167
7.2.4	Gewichtsverlagerung hin zu Montagearbeit	169
7.2.5	Umgang mit Hochvolt-Systemen	172
7.2.6	Nationale Plattform Elektromobilität – Folgerungen für Qualifizierung.....	174
7.2.7	Arbeitsschutz und arbeitswissenschaftlich relevante Veränderungen	175
7.3	Ausbildung	177
7.4	Weiterbildung	180
7.5	Komponentenspezifische Qualifikationserfordernisse	182
7.5.1	Batterie	183
7.5.2	Elektromotor	185
7.5.3	Leistungselektronik.....	188
7.5.4	Brennstoffzellensystem.....	191
7.6	Bildungsinfrastruktur in der Standortumgebung.....	192
7.6.1	Vorbemerkung zum Begriff „Standortumgebung“	193
7.6.2	Bedarfsanalyse Bildungsinfrastruktur	194
7.7	Arbeitsmarkt und demographischer Wandel	197
7.8	Wirkungsanalyse Qualifikationen: Resümee und Ausblick.....	200
8	Wertschöpfungskette, Branchenumfeld, Strategische Allianzen	204
8.1	Branchenumfeld (insbesondere Zuliefererstruktur in Baden-Württemberg)	204
8.2	Wandel in der automobilen Wertschöpfungskette	210
8.2.1	Kooperationen in der Automobilwirtschaft.....	210
8.2.2	Einordnung des Begriffs der Allianz	211
8.2.3	Phasen einer Strategischen Allianz	212
8.2.4	Sonstige Unternehmensbeziehungen	213
8.3	Unternehmensbeziehungen bei betrachteten Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs	214
8.3.1	Batteriesystem	214
8.3.2	Elektromotor	216
8.3.3	Leistungselektronik.....	219
8.3.4	Brennstoffzelle	220
8.3.5	Alternative Strategien zur Allianzbildung	223
8.3.6	Auswertung und Fazit	223
8.3.7	Implikationen	226
8.4	Ausblick und Klärung des weiteren Forschungsbedarfs	227
9	Zusammenfassung der Ergebnisse	228
10	Literaturverzeichnis	237
11	Abbildungsverzeichnis.....	245
12	Tabellenverzeichnis.....	249
13	Anhang	250
13.1	Bauteilanalysen	250
13.1.1	Verbrennungsmotor	251
13.1.2	8-Gang-Automatikgetriebe	253
13.1.3	8-Gang-Hybridgetriebe (E-Maschine separat betrachtet).....	254
13.1.4	Two-Mode-Getriebe	255
13.1.5	Leistungselektronik.....	257

13.1.6	Elektrische Maschine	259
13.1.7	Traktionsbatterie (mit Batterien im Rundzell-Design).....	261
13.1.8	Traktionsbatterie (mit Batterien im Pouch-Zell-Design).....	264
13.1.9	Brennstoffzellen-System	267
13.1.10	Wasserstofftank	271
13.2	Systeme der Referenz-Fahrzeuge.....	272
13.2.1	Systeme des Referenz-Fahrzeugs ICE 2030	272
13.2.2	Systeme des Referenz-Fahrzeugs Mild-HEV 2030.....	273
13.2.3	Systeme des Referenz-Fahrzeugs Full-/ Plug-In-HEV 2030	274
13.2.4	Systeme des Referenz-Fahrzeugs REX 2030	275
13.2.5	Systeme des Referenz-Fahrzeugs BEV 2030	276
13.2.6	Systeme des Referenz-Fahrzeugs FCV 2030.....	277

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
AG	Aktiengesellschaft
AMT	Automatic Manual Transmission
AP	Arbeitspaket
AS	Axle-Split
ASM	Asynchronmaschine
AT	Automatic Transmission
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BCG	Boston Consulting Group
BEV	Battery Electric Vehicle
BGI	Berufsgenossenschaftlichen Informationen
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Batteriemanagement-System
B-VEFK	Bereichsverantwortliche Elektrofachkräfte
BZ	Brennstoffzelle
CAB	Controlled Atmosphere Brazing
CAI	Controlled Auto Ignition
CARS	Clusterinitiative Automotive Region Stuttgart
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEP	Clean Energy Partnership
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSE	Cell Supervising Electronic
CVT	Continuously Variable Transmission
DC	Direct Current
DCB	Direct Copper Bond
DGB	Deutscher Gewerkschaftsbund
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DoD	Depth of Discharge
E/E	Elektrik/Elektronik
EFFfT	Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten
EFKmf	Elektrofachkraft mit Fachverantwortung
ELAB	Forschungsprojekt „Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung“
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ePTFE	expanded Polytetrafluorethylen
EV	Electric Vehicle
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Universität Erlangen-Nürnberg
FCV	Fuel Cell Vehicle
Fe ₂₀ Cr ₄ V	Eisen-Chrom-Vanadium (für bspw. Bipolar Folien)
FEFA	Fachkundige für elektrische Fahrtriebe
FfHV	Fachkraft für Hochvolt-Systeme in Kraftfahrzeugen
FH	Fachhochschule
FK	Institut für Fahrzeugkonzepte
FTE	Full Time Equivalent
FuE	Forschung und Entwicklung
GDL	Gas Diffusion Layer
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GHG	Greenhouse Gas Emissions
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
G-VEFK	Gesamtverantwortliche Elektrofachkraft

H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HI-LEVEL	Projekt „Hochstromleiterplatten als Integrationsplattform für Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen“
HV	Hochvolt
IAB	Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung
IAO	Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
ICE	Internal Combustion Engine; im Rahmen von ELAB Verbrennungsmotorbasiertes Fahrzeug
IEA	International Energy Agency
IFAM	Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
IG	Industriegewerkschaft
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IHK	Industrie- und Handelskammer
IMU	Institut für Medienforschung und Urbanistik e.V.
IPM	Integrierte Permanentmagneten
IRWAZ	Individuelle, regelmäßige wöchentliche Arbeitszeit
ISI	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung
IT	Informationstechnik
KG	Kapitalgesellschaft
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LiFePo ₄	Lithiumeisenphosphat
Li-Ion	Lithium-Ionen
M/M	Metall/Mechanik
MA	Mitarbeiter
MdB	Mitglied des Deutschen Bundestages
MdL	Mitglied des Landtages
MEA	Membran Electrode Assembly
MFW	Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MT	Manual Transmission
NaS	Natriumsulfid
NBE	Nationale Bildungskonferenz Elektromobilität
Nd-Fe-B	Neodym-Eisen-Bor
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
O ₂	Sauerstoff
OEM	Original-Equipment-Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PCB	Printed Circuit Board
PDU	Power Distribution Unit
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PEM	Proton Exchange Membran
PEMFC	Proton Exchange Membran Fuel Cell
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PMB	Power Management Board
ppm	parts per million
PR-149	Perylene Red Pigment 149
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
Pt	Platin
PTFE	Polytetrafluorethylen
PTW	Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, TU Darmstadt

PWM	Puls-Weiten-Modulation
QS	Qualitätssicherung
REX	Range-extended Electric Vehicle
RWTH	Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule
SASAC	State-owned Assets Supervision and Administrative Commission of the State Council
SiC	Siliciumcarbid
SMD	Surface-Mounted Device
SoP	Start-of-Production
SSM	Stromerregte Synchronmaschine
SU	Standortumgebung
SyR	Synchrone Reluktanzmaschine
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
TDI	Turbocharged Direct/Diesel Injection
THT	Through Hole Technology
TiN	Titannitrid
TSI	Turbocharged Stratified Injection
TU	Technische Universität
VAC	Vacuumschmelze
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.
VEFK	Verantwortliche Elektrofachkraft
VES	Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VMU	Voltage Measurement Unit
VVTL	Variable Valve Timing and Lift
WBZU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V.
WRS	Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH
WZB	Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

1 Einleitung und Struktur des Abschlussberichts

1.1 Ausgangssituation

Der Wandel hin zur Elektromobilität stellt die Automobilhersteller, ihre Zulieferer und alle weiteren mit der Automobilwirtschaft verknüpften Branchen vor enorme Herausforderungen. Dieser technologische Wandel „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ ist – verbunden mit einem gesellschaftlichen Wandel bei Mobilitätskonzepten – als langfristiger Systemwechsel für die weltweite Automobilindustrie zu betrachten. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden Wertschöpfungsanteile neu verteilt – sowohl zwischen entfallenden und neuen Komponenten als auch zwischen etablierten und neuen Unternehmen in der Wertschöpfungskette. Mit der Einführung von elektromobilen Antriebskonzepten werden neue oder stark veränderte Bauteile benötigt, Anlagentechnologien und Produktionsprozesse verändern sich und müssen entsprechend flexibel ausgelegt werden, die Frage nach Produktionskapazitäten stellt sich neu und nicht zuletzt werden sich beispielsweise neue Anforderungen an Ausbildung und Qualifizierung herausbilden.

Elektromobilität eröffnet Unternehmen somit nicht nur Chancen, sondern stellt diese auch vor Herausforderungen. Die besondere Herausforderung für etablierte Zulieferer mit einer hervorragenden Kompetenz im verbrennungsmotorbasierten Antriebsstrang liegt in der Fortschreibung des erarbeiteten Wettbewerbsvorteils in der etablierten Technologie bei parallelem Aufbau von Kompetenz und Produktionskapazität hinsichtlich der alternativen Antriebe. Dem „Management des Wandels“ kommt damit eine besondere Bedeutung zu; und zwar sowohl für die Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette als auch für das institutionelle Umfeld.

Wirkungen des langfristigen Wandels zur Elektromobilität auf Beschäftigung wurden bisher sowohl in der quantitativen als auch der qualitativen Dimension kaum detailliert analysiert. Für quantitative Wirkungen im weltweiten Maßstab – bis zur Ebene Europa heruntergebrochen – liegt die Studie „Boost“ von McKinsey für den Betrachtungszeitraum bis 2030 vor, laut der v. a. durch Marktwachstum weltweit 420.000 und europaweit fast 110.000 zusätzliche Arbeitsplätze in der Powertrain-Industrie entstehen werden (Malorny & Linder, 2012). Für Deutschland ermittelte die Nationale Plattform Elektromobilität ein Potenzial von rund 30.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen in der Automobil- und Zulieferindustrie bis 2020, das unter Voraussetzungen wie z. B. der Industrialisierung der Elektromobilität an deutschen Standorten gehoben werden kann (NPE, 2011). Für Baden-Württemberg wurden in der Strukturstudie BWe mobil 2011 potenzielle Beschäftigungseffekte von 20.000 Vollzeitäquivalenten bis 2020 errechnet, davon die Hälfte mit eindeutigen Bezug zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs („unter optimaler Ausnutzung bestehender Potenziale“), die andere Hälfte bei konventionellen Komponenten durch Marktwachstum (Spath, et al., 2011). Diese auf den verschiedenen räumlichen Ebenen insgesamt positiven Beschäftigungseffekte basieren jeweils auf der Annahme, dass konventionelle Antriebe und elektrifizierte Antriebe (in erster Linie die verschiedenen Hybridkonzepte) in einem wachsenden Automobilmarkt im nächsten bzw. in den beiden nächsten Jahrzehnten parallel produziert werden. So verfügen laut Boost-Studie im Jahr 2030 noch drei Viertel der Autos über einen Verbrennungsmotor, gleichzeitig haben zwei Drittel der Autos einen (zusätzlichen) Elektroantrieb.

1.2 Zielsetzung von ELAB

Diese stark aggregierten Untersuchungen zu quantitativen Arbeitsplatzeffekten im großräumigen Maßstab werden bisher nicht durch kleinräumige, betriebsbezogene Studien gestützt. Gleichzeitig bestehen bei der Untersuchung von qualitativen Beschäftigungseffekten, also den Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Kompetenzanforderungen und auf Qualifikationen bei den Beschäftigten, erhebliche Forschungsbedarfe. Was also bisher fehlt, ist eine feinkörnige Analyse der Beschäftigungswirkungen aus der Bottom-up-Perspektive einer Antriebsstrangproduktion. Hier setzt die vorliegende ELAB-Studie der drei Forschungsinstitute Fraunhofer IAO, DLR-FK und IMU Institut an. Das Forschungsprojekt „Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung“ (ELAB) ist als eine Wirkungsanalyse alternativer Antriebskonzepte am Beispiel einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion angelegt, in deren Zentrum die Beschäftigungseffekte in quantitativer und in qualitativer Dimension stehen. Das Ziel von ELAB ist demnach die Beschreibung und Quantifizierung der Wirkungen von Elektromobilität auf die Beschäftigung in der Antriebsstrangproduktion einschließlich der Standortumgebung. Dadurch soll die Wissensbasis der betrieblichen und der gesellschaftlichen Akteure, insbesondere der Mitbestimmungsträger, erweitert werden. Die gesellschaftliche Relevanz des Forschungsvorhabens ergibt sich zusammengefasst aus der Verbindung von Fragen des Technologiewandels und der Beschäftigungswirkungen in quantitativer und qualitativer Dimension mit Fragen betrieblicher und überbetrieblicher Möglichkeiten zur aktiven Gestaltung des Wandels und der hierfür erforderlichen Innovationsprozesse.

1.3 Fragestellungen und Vorgehen

Welche Beschäftigungseffekte resultieren aus dem technologischen Wandel zur Elektromobilität für die Antriebsstrangproduktion? – das ist die zentrale Fragestellung des Forschungsprojekts ELAB. Diese Fragestellung lässt sich in zwei Wirkungsdimensionen aufgliedern:

- Quantitative Beschäftigungswirkungen: Wie viel Beschäftigung ist mit der Produktion der verschiedenen Antriebskonzepte verbunden? Welche Unterschiede im Arbeitsvolumen gibt es bei der Produktion konventioneller, hybridisierter, batterieelektrischer und brennstoffzellenbasierter Antriebsstränge?
- Qualitative Beschäftigungswirkungen: Wie wirkt sich der technologische Wandel auf Arbeitsinhalte, auf Kompetenzanforderungen, auf Qualifikationsbedarfe von Beschäftigten in der Antriebsstrangproduktion aus?

Diese beiden Wirkungsdimensionen werden in der ELAB-Studie durch einen Betrachtungshorizont bis 2030 in die zeitliche Dimension mittels Szenarien gestaffelt.

Für die Bearbeitung der Projektaufgabe wurde ein schrittweises, aufeinander aufbauendes Vorgehen gewählt, das aus einer Verzahnung von ingenieurwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Analysen bestand. Im ersten Schritt erfolgten die Charakterisierung von heutigen und zukünftigen konventionellen und alternativen Antriebskonzepten sowie die Analyse der verschiedenen Komponenten und Bauteile. Im zweiten Schritt wurden die Produktionsprozesse der verschiedenen Antriebsstrangkomponenten im Hinblick auf Fertigungsschritte, Anlagentechnologien, Wertschöpfungsbeiträge und benötigte Mitarbeiter auf Basis einer empirischen Erhebung modelliert. Im dritten Schritt erfolgte die quantitative und qualitative Wirkungsanalyse auf Beschäftigung, auf Wertschöpfung und auf die Standortumgebung unter Zugrundelegung von Szenarien über die Diffusion alternativer Antriebe.

Diese vielschichtigen Zusammenhänge, die sich aus der zentralen Fragestellung ergeben, wurden für die Bearbeitung auf sieben Forschungsfragen heruntergebrochen:

- Wie wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Gestaltung zukünftiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte?
- Wie könnte die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mittel- und langfristig den Fahrzeugabsatz beeinflussen?
- Auf welche Bereiche wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in einer Aggregatproduktion und welche Fertigungsprozesse sind zu beherrschen?
- Welchen Personalbedarf erfordert die Produktion der Komponenten des neuen Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang?
- Wie stark ist der Einfluss der Elektrifizierung auf den Gesamt-Personalbedarf in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion?
- Wie verändern sich Kompetenzanforderungen im Technologiewandel? Welche Qualifikationen von Beschäftigten sind für die Produktion von neuen Antriebssträngen notwendig? Wie können Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel unterstützen?
- Wie wirkt sich der Technologiewandel „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ auf die Zuliefererstruktur aus? Welche Veränderungen ergeben sich durch neue Allianzen in der elektromobilen Wertschöpfungskette?

Für die differenzierte Bearbeitung der Forschungsfragen wurden verschiedene Methoden eingesetzt: Im Zentrum der methodischen Vorgehensweise der ersten, ingenieurwissenschaftlichen Schritte stand die detaillierte Analyse von Fahrzeugkonzepten bis auf Bauteileebene und die Modellierung von Produktionsprozessen, gestützt auf eigene Vorarbeiten der Forschungsinstitute, auf Experteninterviews (Entwickler, Produktionsplaner, Personaler und weitere betriebliche Experten, Wissenschaftler aus den Bereichen Produktionstechnik, Arbeitsmarktforschung, etc.) und auf eine Literaturrecherche. Für die Wirkungsanalyse wurden aus dem Methodenspektrum der qualitativen Sozialforschung sowohl leitfadengestützte Experteninterviews und Expertenworkshops (Gruppendiskussionen) als auch Desk-Research mit der Inhaltsanalyse von Literatur, Gutachten, Studien sowie weiteren Dokumenten und Informationen genutzt.

1.4 Projektstruktur und Projektpartner

Die ELAB-Studie wurde vom Gesamtbetriebsrat der Daimler AG initiiert und gemeinsam mit dem Unternehmen auf den Weg gebracht. Mit der Bearbeitung wurden drei Forschungsinstitute – das Fraunhofer IAO, das IMU Institut Stuttgart und das DLR Institut für Fahrzeugkonzepte – beauftragt. Getragen und finanziert wurde das Forschungsprojekt von der Hans-Böckler-Stiftung, der Daimler AG und der IG Metall Baden-Württemberg.

Für die Bearbeitung der ELAB-Fragestellung ist eine Verknüpfung der ingenieurwissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Perspektive auf den Untersuchungsgegenstand notwendig. Die drei sich komplementär ergänzenden Institute arbeiteten mit folgenden jeweiligen Schwerpunkten zusammen:

- DLR - Institut für Fahrzeugkonzepte: Definition Fahrzeugkonzepte, Analyse technologischer Entwicklungstrends, Bauteilanalyse relevanter Systeme der Elektromobilität, Marktszenarien.
- Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation: Herstellprozesse und Produktionstechnologien (konventioneller und neuer Komponenten), quantitative Wirkungsanalyse des Personalbedarfs (Personalbedarf der Komponenten, Personalbedarf einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion), Wertschöpfungskette (Strategische Allianzen und Zusammenarbeit).

- IMU Institut: Qualitative Wirkungsanalyse Beschäftigung (Kompetenzanforderungen im Wandel, Ausbildung, Weiterbildung), qualitative Wirkungs-, Bedarfs- und Kontextanalyse Standortumgebung.

Die Forschungsinstitute wurden bei der konzeptionellen, analytischen und empirischen Arbeit und bei der Ergebnisdiskussion durch die Auftraggeber und durch Projektbeiräte beraten und unterstützt. Verschiedene Akteure und Institutionen wurden auf drei Wegen in das Forschungsprojekt ELAB eingebunden:

- Forschungsbeirat mit von der Hans-Böckler-Stiftung einberufenen Vertretern aus Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften, Verbänden.
Beiratsmitglieder: Prof. Dr. Stefan Bratzel (Center of Automotive Management), Dr. Christel Degen (DGB Bundesvorstand), Dimitrios Galagas (DGB Baden-Württemberg), Holger Haas (Wirtschaftsförderung Region Stuttgart), Frank Iwer (IG Metall Baden-Württemberg), Prof. Dr. Ulrich Jürgens (WZB), Prof. Dr. Achim Kampker (RWTH Aachen), Ute Kumpf (MdB), Andrea Lindlohr (MdL), Uwe Meinhardt (IG Metall Stuttgart), Dr. Heinz-Rudolf Meißner (FAST Berlin), Prof. Dr. Gunther Reinhart (TU München), Prof. Dr. Peter Nyhuis (Universität Hannover), Prof. Dr. Markus Peschel (FH Nordwestschweiz), Prof. Dr. Hans-Christian Reuss (Universität Stuttgart), Dr. Marc Schietinger (Hans-Böckler-Stiftung), Uwe Wötzel (Verdi)
Projektteam: Prof. Dr. Wilhelm Bauer (Fraunhofer IAO), Dr. Jürgen Dispan (IMU), Prof. Dr. Horst Friedrich (DLR), Prof. Dr. Dieter Spath (Fraunhofer IAO).
- Industriebeirat mit den Auftraggebern Daimler AG, IG Metall Baden-Württemberg, Hans-Böckler-Stiftung:
Beiratsmitglieder Daimler AG / Gesamtbetriebsrat: Erich Klemm, Dr. Thomas Metz, Wolfgang Nieke, Stefan Schwaab.
Daimler AG / Unternehmensleitung: Dr. Udo Hartmann, Oskar Heer, Prof. Dr. Herbert Kohler, Prof. Dr. Eckhard Kreßel, Guido Krupinski, Karl-Ernst Mauser, Herr Rathke, Peter Schabert, Stefan Schneider, Wolfgang Trefz, Günter Walz
IG Metall: Jörg Hofmann.
Hans-Böckler-Stiftung: Dr. Nikolaus Simon.
Projektteam: Prof. Dr. Wilhelm Bauer (Fraunhofer IAO), Dr. Jürgen Dispan (IMU), Prof. Dr. Horst Friedrich (DLR), Prof. Dr. Dieter Spath (Fraunhofer IAO).
- Workshops im Sinne eines prozessbegleitenden „critical review“ mit betrieblichen Experten aus den Bereichen Betriebsrat, Forschung und Entwicklung, Personal, Produktionsplanung etc.

1.5 Struktur des Abschlussberichtes

Der ELAB-Abschlussbericht stellt die Projektergebnisse in differenzierter Form dar. Die folgenden Hauptkapitel sind nach Forschungsfragen aus sieben unterschiedlichen Bereichen gegliedert. Diese sind nachfolgend aufgelistet.

Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Zu klärende Forschungsfrage: Wie wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Gestaltung zukünftiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte?

Inhalte: Identifikation und Analyse heutiger elektrifizierter Fahrzeug- und Antriebskonzepte, Analyse und Interpretation marktlicher und technologischer Entwicklungstrends, Simulation zukünftiger Referenz-Fahrzeugkonzepte und Dimensionierung der Antriebsstränge, Komponenten- und Bauteilanalyse konventioneller und neuartiger Fahrzeugsysteme. Hierzu zählen Verbrennungsmotor, (Hybrid-) Getriebe, Elektrische Maschine, Batteriesystem, Brennstoffzellensystem, Leistungselektronik und Wasserstoffdrucktank.

Absatzszenarien

Zu klärende Forschungsfrage: Wie könnte die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mittel- und langfristig den Fahrzeugabsatz beeinflussen?

Inhalte: Meta-Analyse veröffentlichter Szenarien zur Elektromobilität aus Politik, Wissenschaft und Industrie, Detailanalyse ausgewählter Zeiträume, Definition eines ELAB-Referenzszenarios und Abbildung zukünftiger Marktanteile konventioneller sowie elektrifizierter Fahrzeugkonzepte. Hierzu zählen verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge, Mild-, Voll- und Plug-In Hybride, rein batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge und Fahrzeuge mit Range Extender sowie Brennstoffzellenfahrzeuge. Ableitung von drei „what-if“-Szenarien zur Analyse von Konsequenzen und Sensitivitäten alternativer Entwicklungspfade.

Produktion der Komponenten

Zu klärende Forschungsfrage: Auf welche Bereiche wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in einer Aggregateproduktion und welche Fertigungsprozesse sind zu beherrschen?

Inhalte: Beschreibung der Herstellprozesse und Produktionstechnologien der Komponenten des konventionellen sowie des alternativen Antriebsstrangs. Hierzu zählen Verbrennungsmotor, Getriebe, elektrische Maschine, Batteriesystem, Leistungselektronik sowie Brennstoffzellensystem. Es erfolgt ein Überblick über relevante Techniken und Verfahren in den Hauptgruppen der Fertigungstechnik. Neben einer Beschreibung der Haupt- und Nebenkomponten der Systeme erfolgt eine Übersicht der jeweiligen Fertigung. Im Rahmen einer detaillierten Prozessbeschreibung erfolgt weiterhin ein Überblick über den Stand der Technik bei den Produktionstechnologien sowie Prozessinnovationen.

Personalbedarf Produktion der Komponenten

Zu klärende Forschungsfrage: Welchen Personalbedarf erfordert die Produktion der Komponenten des neuen Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang?

Inhalte: Beschreibung der Methodik und Darstellung der Ergebnisse der Ermittlung des stückzahlabhängigen Personalbedarfs für Komponenten des neuen sowie des konventionellen Antriebsstrangs, Erläuterung der Vorgehensweise zur Datenermittlung und Zusammenführung, Darstellung der für die Interviews identifizierten relevanten Unternehmen, Auflistung und Detaillierung der generellen Annahmen und Einschränkungen sowie getroffenen Definitionen, detaillierte Darstellung des jeweiligen Personalbedarfs der verschiedenen Komponenten für direkte, indirekte und produktionsnahe indirekte Mitarbeiter für unterschiedliche Produktionsvolumen.

Personalbedarf idealtypischer Produktion

Zu klärende Forschungsfrage: Wie stark ist der Einfluss der Elektrifizierung auf den Gesamtpersonalbedarf in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion?

Inhalte: Aufbau eines Werkzeugs zur Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion sowie die Darstellung der gewonnenen Ergebnisse. Detaillierung der Annahmen und Definitionen zur Beschreibung einer idealtypischen Produktion, Zusammenführung der bisherigen Arbeitsergebnisse der definierten Antriebskonzepte, Marktszenarien sowie des Personalbedarfs bei der Produktion der Komponenten im Rahmen eines Excel-Tools zur Ermittlung des Personalbedarfs in einer idealtypischen Produktion unter Berücksichtigung der Beschreibung einer idealtypischen Produktion sowie eine detaillierte Beschreibung des differenzierten Personalbedarfs in Abhängigkeit der erarbeiteten Szenarien.

Kompetenzanforderungen und Qualifikationen

Zu klärende Forschungsfrage: Wie verändern sich Kompetenzanforderungen im Technologiewandel? Welche Qualifikationen von Beschäftigten sind für die Produk-

tion von neuen Antriebssträngen notwendig? Wie können Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel unterstützen?

Inhalte: Entwicklungstrends der Industriearbeit im Allgemeinen sowie der Wandel der Kompetenzanforderungen infolge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und weitere arbeitswissenschaftlich relevante Veränderungen im Speziellen werden aufgezeigt. Auf berufliche Bildung bezogene neue Bedarfe sowie komponentenspezifische Qualifikationserfordernisse werden anschließend diskutiert. Dann wird im Sinne einer „Bedarfsanalyse Standortumgebung“ der Frage nachgegangen, wie Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel durch eine Verbesserung von Standortfaktoren (wie z. B. Bildungsinfrastruktur) unterstützen können. Abschließend wird ein Ausblick auf die zukünftige Lage am Arbeitsmarkt und auf Fachkräftengpässe in Folge des demographischen Wandels dargestellt.

Branchenumfeld, Wertschöpfungskette und Strategische Allianzen

Zu klärende Forschungsfragen: Wie wirkt sich der Technologiewandel „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ auf Zuliefererstrukturen im Branchenumfeld aus? Vor welche Herausforderungen werden Zulieferer gestellt? Welche Veränderungen ergeben sich durch neue Allianzen und Zusammenschlüsse in der elektromobilen Wertschöpfungskette?

Inhalte: Im Sinne einer „Wirkungsabschätzung Standortumgebung“ wird im Kapitel zunächst die Frage nach Wirkungen auf Zuliefererstrukturen und nach künftigen Herausforderungen für Zulieferer in der Standortumgebung diskutiert. Im zweiten Schritt erfolgt eine vergleichende Beschreibung aktueller Kooperationen und Lieferbeziehungen bei den definierten Komponenten für deutsche und internationale Automobilbauer. Neben einer allgemeinen Beschreibung und Erläuterung von Formen der Zusammenarbeit erfolgt eine deskriptive Beschreibung aktueller Ausgestaltung von Unternehmensbeziehungen bei den Herstellern von Fahrzeugen und elektrifizierten Antriebsstrangkomponenten sowie eine Darstellung wesentlicher Akteure und die Erarbeitung regionaler Unterschiede bei der Ausgestaltung von Kooperationen im Bereich elektrifizierter Komponenten.

2 Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Autoren: Benjamin Frieske (DLR-FK), Bernd Propfe (DLR-FK), Martin Redelbach (DLR-FK), Dr.-Ing. Stephan Schmid (DLR-FK)

Mit der fortschreitenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs ergeben sich veränderte oder gar neuartige Anforderungen an die Entwicklung und Produktion zukünftiger Fahrzeugkonzepte.

Das Ziel des Projektteils ist es, die zukünftig produktionsrelevanten Bauteile verschiedener elektrifizierter Antriebsstränge zu identifizieren und detailliert zu beschreiben. Hiermit soll eine Antwort auf folgende Forschungsfrage gegeben werden: Wie wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Gestaltung zukünftiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte?

Hierfür ist es in einem ersten Schritt notwendig, diejenigen Antriebskonzepte herzu-leiten, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion der Zukunft gefertigt werden können. Danach werden die definierten Referenz-Antriebsstränge einer Detailanalyse unterzogen, um sie in produktionsrelevante Systeme, Subsysteme, Komponenten und Einzelteile zu zerlegen. Auf Basis der Erkenntnisse werden wo möglich den Produkteinzelteilen zusätzlich in einem weiteren Schritt charakteristische Werkstoffe und Fertigungskategorien zugeordnet. So soll eine geeignete Datenbasis für die in den nachfolgenden Projektteilen durchzuführende detaillierte Modellierung von Produktionsprozessen konventioneller und neuer Antriebsstrangkomponenten geschaffen werden.

2.1 Übersicht alternativer Antriebskonzepte

Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Studie wird der Untersuchungsgegenstand „alternative Antriebskonzepte“ relativ breit definiert. Ein Antriebskonzept besteht demnach aus verschiedenen für den Antriebsstrang eines Fahrzeugs relevanten Technologiesystemen, die weiter in Subsysteme, Komponenten und Produkteinzelteile unterteilt werden. Die zum Zwecke des Fahrbetriebs eingesetzten Komponenten (hier insbesondere: Verbrennungsmotor, E-Maschine, Generator, Batterie, Getriebe) können sich in ihrer individuellen Auslegung sowie dem Aufbau und der Positionierung im Gesamtsystem unterscheiden und definieren so im wechselseitigen Zusammenspiel die Antriebsarchitektur und -topologie.

Alternative Antriebskonzepte gehen über den „State-of-the-art“ hinaus. Im Verständnis dieser Studie umfassen sie alle Konzepte, die den konventionellen Verbrennungsmotor technologisch ergänzen und/ oder erweitern oder durch eine alternative Antriebsart ersetzen. Mit der Entwicklung und dem Einsatz neuartiger Antriebe werden drei grundlegende Ziele verfolgt: Minderung des Verbrauchs, Reduktion von Emissionen sowie Erhöhung der Fahrdynamik.

Im Rahmen der Studie werden folgende Fahrzeugkonzepte betrachtet, die im Weiteren hinsichtlich grundsätzlichen Merkmalen und Funktionsprinzipien erläutert werden sollen:

- Hybrid Electric Vehicles (HEV)
- Battery Electric Vehicles (BEV)
- Range-extended Electric Vehicles (REX)

- Fuel Cell Vehicles (FCV)

Abbildung 1 fasst die betrachteten alternativen Antriebskonzepte und Antriebsstrang-Architekturen zusammen.

Mild-HEV			Full-HEV			PHEV			REX			BEV			FCV		
			Seriell			Seriell			Seriell			Zentralmotor			Zentralmotor		
Parallel			Parallel			Parallel						Radnaher Motor					
P1	P2	AS	P1	P2	AS	P1	P2	AS				Radnabenmotor					
			Kombiniert			Kombiniert											

Abbildung 1: Betrachtete alternative Antriebskonzepte und mögliche Architekturen (Grafik: DLR)¹

2.1.1 Hybrid Electric Vehicles (HEV)

Wesentliches Merkmal von **Hybrid-Fahrzeugen** ist der zusätzlich zum Verbrennungsmotor eingebaute Elektromotor. Je nachdem, welche Antriebsarchitektur genutzt wird, ist das Zusammenspiel zwischen Verbrennungs- und Elektromotor(en) zu regeln. Die Antriebsarchitekturen bei Hybrid-Fahrzeugen können generell in die drei Varianten seriell, parallel und Power-split unterteilt werden. Abbildung 2 stellt die Funktionsprinzipien der drei Architekturen generisch dar.

Weiterhin sind derzeitige realisierte oder sich in der marktnahen Entwicklung befindliche Hybrid-Fahrzeugkonzepte geprägt durch den Grad der Hybridisierung: Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid, Voll-hybrid und Plug-In Hybrid.

Folgende generelle Vorteile bei der Nutzung von Elektromotoren in Ergänzung zu konventionellen Verbrennungsmotoren können beim Hybrid-Konzept realisiert werden:

- Ein Elektromotor ermöglicht konstant hohe Drehmomente schon bei niedrigen Drehzahlen und ergänzt den Verbrennungsmotor, da dessen Drehmoment erst bei mittleren Drehzahlen ansteigt. Das Zusammenspiel beider Motoren erlaubt so insgesamt die Realisierung einer höheren Fahrdynamik.
- Der Verbrennungsmotor wird vorwiegend im Bereich des Wirkungsgradoptimums arbeiten. Dies resultiert in einem geringeren Verbrauch und weniger Schadstoffemissionen. Zudem kann durch die zusätzliche elektrische Leistung bei gleichbleibender Gesamtleistung ein kleinerer Verbrennungsmotor und möglicherweise ein länger übersetztes Getriebe eingesetzt werden, was wiederum dem Kraftstoffverbrauch und den erzeugten Emissionen entgegenwirkt.

¹ HEV: Hybridfahrzeug (Hybrid Electric Vehicle), REX: Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (Range-extended Electric Vehicle), BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle), FCV: Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Vehicle).

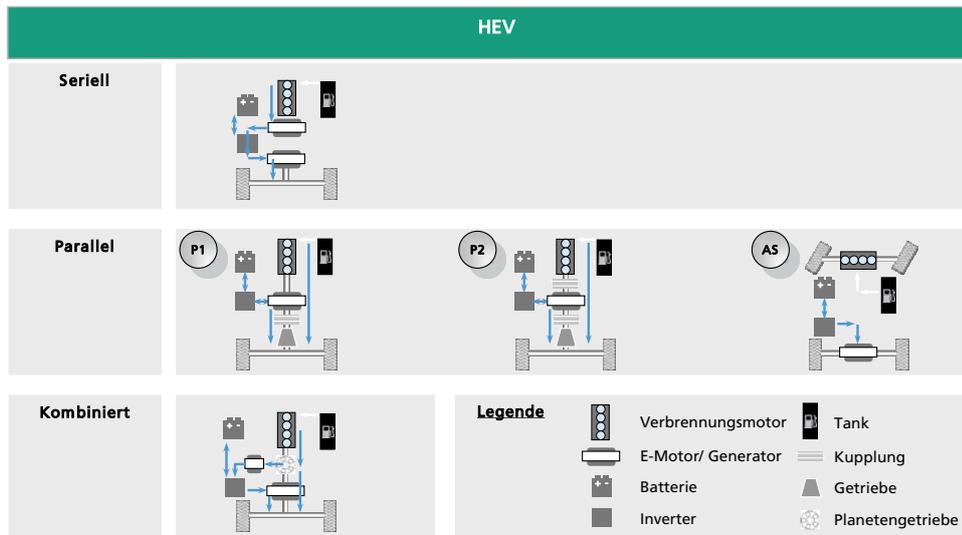


Abbildung 2: Antriebsstrang-Architekturen – Hybridfahrzeuge (HEV) (Grafik: DLR)

Der **serielle Hybrid** besteht in der Regel aus einem mit einem Generator gekoppelten Verbrennungsmotor, der allerdings nie direkt als Antrieb arbeitet. Vielmehr hat der Generator die Funktion eines Energiewandlers, der eine in Reihe geschaltete elektrische Maschine antreibt, die die elektrische Leistung in die Batterie speist oder sie an einen weiteren Elektromotor abgibt. Dieser Elektromotor treibt dann das Fahrzeug an. Eine mechanische Verbindung zwischen Verbrennungsmotor und Antriebsachse besteht nicht. Vorteil der seriellen Antriebsarchitektur ist, dass der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors optimal gewählt werden kann. Verbrauch und Emissionsausstoß werden dadurch verringert. Grundlegende Nachteile sind relativ hohe Wirkungsgradverluste durch den notwendigen mehrfachen Wandel der erzeugten Leistung. Zudem ist diese Architektur durch relativ hohe Kosten und durch die Größe der Komponenten und Bauteile sowie dem damit verbundenen Mehrgewicht des Fahrzeugs gekennzeichnet.

Der **parallele Hybrid** kann sowohl den Verbrennungs- als auch den Elektromotor zum direkten Antrieb des Fahrzeugs nutzen. Hier ist nur eine E-Maschine verbaut, die sowohl generatorisch als auch motorisch eingesetzt werden kann. Die Kombination beider Systeme erlaubt z.B. eine Drehmomentaddition und hohe Wirkungsgrade, jedoch können die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors dagegen in der Regel nicht frei gewählt werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Parallel-Hybrid zu weiten Teilen auf dem konventionellen Antriebsstrang aufbaut und ihn um zusätzliche Komponenten ergänzt, mit positiven Auswirkungen sowohl auf Bauraum als auch Entwicklungs- und Investitions- bzw. Kostenaufwendungen im Vergleich zur seriellen Architektur. Zudem können die Antriebsaggregate aufgrund der Leistungsaddition bei gleichbleibenden Fahrleistungen kleiner dimensioniert werden. Verschiedene Ausführungen der parallelen Architektur sind möglich und unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich Anzahl und Anordnung produktionsrelevanter Antriebskomponenten. Ein Dominant Design in der Entwicklung hat sich bis heute noch nicht ausgebildet. Zudem ist fraglich, ob dies in Zukunft geschehen wird, da jede Topologie spezifische Vor- und Nachteile aufweist. Vor dem Hintergrund, dass hybride Antriebskonzepte einen Zwischenschritt auf dem Weg hin zu einem reinen batterieelektrischen Fahrzeug darstellen und so die Funktion einer Brückentechnologie einnehmen, ist davon auszugehen, dass verschiedene Architekturen parallel weiterentwickelt und im Markt bestehen werden.

Der sog. **P1-Hybrid** nutzt nur eine Kupplung, um den starr auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors verbauten E-Motor zu betreiben. Beide Motoren sind vor dem Getriebe auf einer gemeinsamen Antriebsachse installiert. Die E-Maschine wird über einen Kurbelwellen-Startergenerator in der Regel nur zum Anlassen des Verbrennungsmotors und zur Bordnetzstromversorgung genutzt. Ein unabhängiger Betrieb von E-Maschine ist nicht möglich, so dass der Verbrennungsmotor generell bei einer möglichen Bremsenergieückgewinnung (Rekuperation) mitgeschleppt werden muss. Die damit einhergehenden Schleppmomente erhöhen die Verlustleistung und bedingen verstärkte Geräusch- und Schwingungsprobleme. Rein elektrisches Fahren ist somit nicht möglich, allein ein elektrisches „Gleiten“ ab einer bestimmten Geschwindigkeit kann realisiert werden. Der **P2-Hybrid** nutzt eine zusätzliche Kupplung, um diese Probleme zu umgehen. Sie wird zwischen Verbrennungs- und Elektromotor installiert und ermöglicht so, den Verbrennungsmotor vom Antriebsstrang abzukuppeln. Schleppverluste spielen damit keine Rolle mehr. Allerdings ist das Packaging der Bauteile zu optimieren, da die zweite Kupplung auf engstem Raum installiert werden muss. Beim **AS-Hybrid** werden Verbrennungs- und Elektromotor auf unterschiedliche Fahrzeugachsen verteilt („Axle-Split“). Die Momente an jeder Achse können dabei innerhalb der Leistungsgrenze frei variiert werden und erlauben so einen fahrdynamisch optimal auslegbaren (allradgetriebenen) Betrieb. Die E-Maschine ist bei dieser Architektur nicht für den Start des Verbrennungsmotors verantwortlich, ein zusätzlicher Anlasser ist vonnöten. Zudem muss ein weiterer Generator am Verbrennungsmotor sowie ein DC/DC-Wandler verbaut werden, um elektrische Aggregate im Stand versorgen zu können und die Batterie zu laden. Der AS-Hybrid erlaubt insgesamt hohe Wirkungsgrade und die Realisierung unterschiedlicher (Hoch-) Drehzahlkonzepte zwischen Verbrennungs- und Elektromotor. Auch kann auf dem konventionellen Antriebsstrang mit nur leichten Modifikationen aufgebaut werden.

Der **Power-split-Hybrid** ist eine Kombination aus serieller und paralleler Topologie. Zum Antrieb des Fahrzeugs wird ein konventioneller Verbrennungsmotor hier durch zwei Elektromotoren unterstützt. Zentrales Getriebeelemente ist ein Planetengetriebe, das die Leistung des Verbrennungsmotors über einen mechanischen und einen elektrischen Pfad abgibt. Der elektrische Pfad führt über die an der Antriebswelle installierte zweite E-Maschine zur direkten Wandlung der elektrischen Energie in mechanische Leistung. Die Power-split Architektur erlaubt eine stufenlose Übersetzung (CVT-Getriebe) und damit einen optimalen Betrieb des Verbrennungsmotors. Ein konventionelles Getriebe muss nicht verbaut werden, so dass verschiedene mechanische Komponenten nicht weiter benötigt werden, insbesondere Schalt- und Kupplungskomponenten. Bei Einsatz eines optionalen Two-Mode-Getriebes werden zwei CVT-Getriebe und zwei Kupplungen verbaut, um so die Energiewandlungspotenziale über einen breiten Geschwindigkeitsbereich zu optimieren. Wirkungsgrade werden damit über die Nutzung von insgesamt zwei elektrischen Fahrstufen und einer mechanischen Übersetzung verbessert. Jedoch ist der Aufbau des Systems hochkomplex und kostenintensiv, das Fahrgefühl insbesondere für europäische Nutzer zudem ungewöhnlich.

Mikro-Hybride bauen üblicherweise auf der parallelen Antriebsarchitektur auf. Die technologischen Veränderungen im Antriebskonzept gegenüber einem konventionell mit Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeug sind minimal. Hauptsächliche Modifikation ist, dass der Anlasser durch einen stärkeren Elektromotor ersetzt und die Motorsteuerung angepasst wird, um Start/Stopp-Funktionen sowie einen verbesserten Generatorbetrieb zu ermöglichen. Die Veränderungen führen zwar zu einer optimierten Energienutzung und somit Verbrauchseinsparungen, ein rein elektrischer Fahrzeugbetrieb ist jedoch nicht möglich. Mikro-Hybride sind im Sinne dieser Studie deshalb keine alternativen Antriebskonzepte und werden nicht weiter betrachtet. **Mild-Hybride** dagegen ermöglichen einen alternativen Fahrzeugbetrieb.

Sie nutzen ebenfalls in der Regel die parallele Architektur und erlauben Funktionalitäten wie Start/Stopp, optimierten Generatorbetrieb, Boost und Rekuperation. Ein relativ klein dimensionierter elektrischer Energiespeicher versorgt dabei den antreibenden Elektromotor mit Energie. **Voll-Hybride** können sowohl auf der seriellen, parallelen als auch Power-split-Architektur aufgebaut sein. Aktuelle, voll-hybridisierte Fahrzeugkonzepte fokussieren stark auf die parallele Architektur (P2-Hybrid), während Toyota auf die leistungsverzweigte Power-split Architektur setzt. Die Batterie unterliegt im Vergleich zum Mild-Hybriden anderen Anforderungen und ist zudem relativ groß dimensioniert, so dass hier rein elektrisches Fahren über längere Strecken und Zeiträume ermöglicht wird (bis ca. 10 km). **Plug-In-Hybride** schließlich unterscheiden sich gegenüber den Voll-Hybriden hauptsächlich dadurch, dass die Traktionsbatterie des Fahrzeugs nicht rein fahrzeugintern durch einen verbrennungsmotorischen Betrieb aufgeladen, sondern zusätzlich über ein externes Ladegerät elektrische Energie übertragen wird. Die Möglichkeiten zum rein elektrischen Betrieb des Fahrzeugs werden damit erweitert (bis ca. 50 km). Im Vergleich zu Voll-Hybriden wird eine zusätzliche Batterie und Ladeeinheit eingebaut oder die bestehende Batterie größer dimensioniert.

2.1.2 Battery Electric Vehicles (BEV)

Rein elektrisch betriebene **Batterie-Fahrzeuge** werden in der Regel durch eine E-Maschine angetrieben, die von einer Traktionsbatterie mit Energie gespeist wird. Im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen entstehen große Vorteile hinsichtlich Bauraum und Teilekomplexität, da der Verbrennungsmotor inklusive der Nebenaggregate sowie der Kraftstoff- und Abgasanlage nicht mehr benötigt werden. Auch auf ein übliches Schaltgetriebe kann verzichtet werden. Insbesondere Hersteller mit hoher Fertigungstiefe müssen die Produktion in den Aggregatwerken anpassen, da beispielsweise eigengefertigte Komponenten und Bauteile für den Verbrennungsmotor wie Zahnräder, Wellen und Gehäuse im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs entfallen. Elektromotoren werden grundsätzlich in der Nähe der Drehachsen für die Räder eingebaut, wobei sich die Antriebsarchitektur auf unterschiedliche Weisen realisieren lässt. Abbildung 3 fasst die drei zentralen Antriebsstrang-Topologien von rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugkonzepten zusammen.

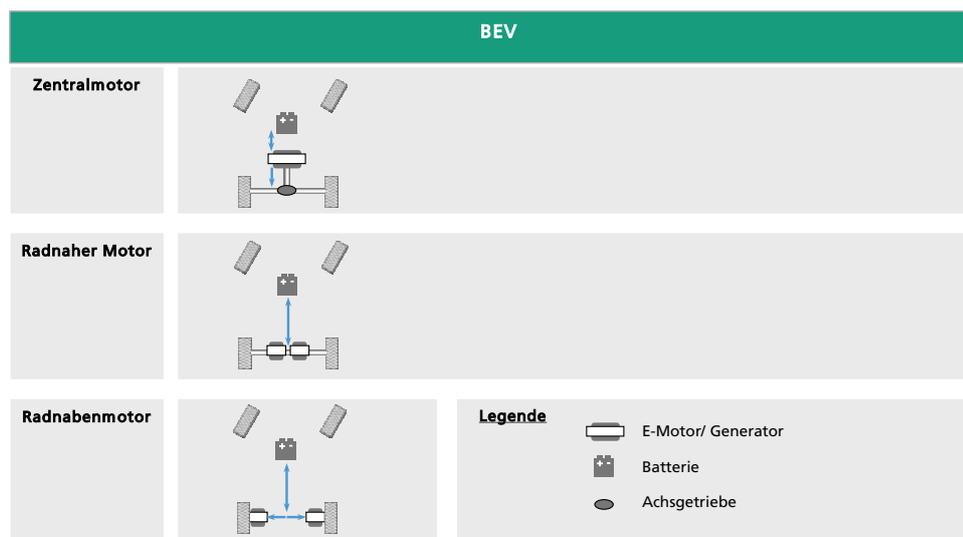


Abbildung 3: Antriebsstrang-Architekturen – Batteriefahrzeuge (BEV) (Grafik: DLR)

Beim **zentral** im Fahrzeug installierten **E-Motor** wird die Kraftübertragung mit Hilfe von Achsgetriebe und Differential ermöglicht. Auf diese Weise können hohe Antriebsdrehzahlen realisiert werden, jedoch ergeben sich Nachteile bei der Bauraumnutzung, da der Bauraum in gesamter Breite benötigt wird. Wird ein **radnaher Antrieb** realisiert, sind zwei E-Maschinen auf der Fahrzeugachse zu verbauen und zudem zwei Getriebe vonnöten, ein Differential entfällt allerdings, da beide Motoren jeweils eine eigene Ansteuerung erhalten und so als elektronisches Differential wirken („Tandem-Motor“). Auch hier kann ein Hochdrehzahlkonzept realisiert werden. Bei der Nutzung von **Radnabenmotoren** werden die E-Maschinen direkt in den Rädern verbaut. In der Regel kann dadurch auf eine Hinterradachse sowie die Installation von Achsgetrieben und Differentialen verzichtet werden. Hohe Drehmomente sind möglich, während dagegen die Drehzahlen relativ niedrig sind. Zudem erhöhen Radnabenmotoren die ungefederten Massen im Fahrzeug, was hinsichtlich Fahrdynamik und Komfort zu Einbußen führen kann. Auch sind Investitions-, Entwicklungs- und Kostenaspekte zu berücksichtigen. Grundsätzlich sind bei Elektrofahrzeugen die Antriebe als Direktantriebe, mit einem festübersetzten Getriebe oder mit einem Schaltgetriebe umsetzbar.

Folgende generelle Vorteile können bei Batteriefahrzeugen realisiert werden:

- E-Maschinen haben gute Leistungsdaten hinsichtlich Drehmomentverlauf, Drehzahlband und Wirkungsgrad und ermöglichen so konstant hohe Drehmomente bei niedrigen Drehzahlen. Hohe Fahrleistungen und -dynamiken sind erzielbar.
- Das Fahrzeug kann lokal emissionsfrei betrieben werden mit optimaler Well-to-Wheel-Bilanz bei Nutzung von regenerativen Energiequellen.
- Ein beinahe lautloser Betrieb des Fahrzeugs ist möglich zur Lärmentlastung insbesondere hoch frequentierter Strecken.
- Der Aufbau des Fahrzeugs ist vergleichsweise einfach, die Teilekomplexität gering. Produktionsketten verkürzen sich somit.

Folgende Nachteile sind mit batterieelektrischen Fahrzeugen verbunden:

- Gegenwärtige Batterietechnologien ermöglichen keine zufrieden stellenden Reichweiten und verteuern individuelle Mobilitätsbedürfnisse. Zudem werden bei individueller Nutzung oft Schnellladungen erforderlich sein, die die Lebensdauer der Batterien verringern.
- Aufwändiges Recycling der Lithium-Ionen-Akkus ist notwendig.

2.1.3 Range-extended Electric Vehicles (REX)

Batteriefahrzeuge mit Range Extender bauen auf der seriellen Hybridarchitektur auf. Hierbei dient allerdings nicht der Elektromotor als optionale Unterstützung des Fahrbetriebs, vielmehr werden zusätzlich zum Batteriesystem ein Verbrennungsmotor und ein Generator eingebaut, der als Nachladeeinheit dazu dient, die Reichweite des Fahrzeugs zu vergrößern. Der Verbrennungsmotor wird meist in stationären Betriebspunkten betrieben, die Wirkungsgrade im oder nahe am Optimum ermöglichen, und dient ausschließlich der Stromerzeugung, um die Batterie während der Fahrt aufzuladen. Ein mechanischer Durchtrieb besteht nicht. Vorteil des Konzepts ist die hinsichtlich Package-relevanter Aspekte hochflexible Positionierung der Nachladeeinheit, die verbrauchs- und schadstoffoptimal im Betriebsoptimum arbeitet. Neben konventionellen, z.B. per Aufladung und Downsizing optimierten Verbrennungsmotoren können u.a. auch Wankelmotoren, 2-Takt-Motoren, Brennstoffzellen-Systeme, Gasturbinen oder Freikolbenlineargeneratoren als Range Extender genutzt werden.

2.1.4 Fuel Cell Vehicles (FCV)

Brennstoffzellen-Fahrzeuge nutzen einen von einem Brennstoffzellensystem mit Energie versorgten Elektromotor zum Antrieb, der sowohl motorisch als auch generatorisch eingesetzt wird. Die Traktionsbatterie wird von der Brennstoffzelle gespeist und speichert die erzeugte elektrische Energie zwischen, um Leistungsspitzen und hochdynamische Lastwechsel zu überbrücken sowie Wirkungsgrade zu erhöhen. Aufgrund der relativ hohen benötigten Leistung des E-Motors wird das Traktionsnetz, das E-Maschine, Hochleistungsverbraucher, Brennstoffzelle und Batterie verbindet, mit einer Gleichspannung bis zu 450 V betrieben. Zusätzliche (Traktions-) DC/DC-Wandler zwischen Brennstoffzellenstack und Batterie sowie zur Versorgung von Niedrigleistungsverbrauchern müssen installiert werden, dagegen entfällt die Installation einer Lichtmaschine. Zusätzlich zur Traktionsbatterie werden Wasserstofftanks zur Energiespeicherung eingesetzt. Brennstoffzellen können insgesamt einen sehr hohen Wirkungsgrad erzielen.

2.2 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die Frage nach dem zukünftig dominanten Antriebs-Design von Kraftfahrzeugen ist geprägt durch eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien, die in den nächsten Jahren im Wettbewerb miteinander stehen. Sowohl Kräfte der verschiedenen Weltmärkte (z.B. Käuferinteressen) als auch gesetzgeberischen Vorgaben in unterschiedlichen Regionen (z.B. Steuernachlässe, Kraftstoffpreise, Abgasgesetzgebung) und technologische Fortschritte durch Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der alternativen Antriebstechnologien (z.B. Energiespeicher, Energiewandler) werden letztendlich die Gewinner und Verlierer in diesem Wettbewerb definieren.

Verschiedene Faktoren sind dabei Treiber der gegenwärtigen Entwicklung, wobei insbesondere im Hinblick auf die Einführung elektrifizierter Fahrzeuge das Ziel in der Reduktion von Verbrauch und Emission liegt, um so nachhaltige Lösungen für eine individuelle Mobilität zu ermöglichen. Neben dem bestimmenden Faktor „Umweltfreundlichkeit“ sind weitere Markttendenzen für die Entwicklung neuer Technologiesysteme verantwortlich: Sicherheit, Komfort, Fahrspaß und Kosten. Diese Kundenbedürfnisse prägen die zukünftigen technologischen Entwicklungsrichtungen alternativer Antriebskonzepte.

Auf dem Weg hin zu einer CO₂-neutralen Zukunft werden unterschiedliche technologische Entwicklungspfade eine Rolle spielen. So ist damit zu rechnen, dass ausgehend von einer Optimierung konventioneller Verbrennungsmotoren zur Effizienzsteigerung, zunehmend hybridelektrische Fahrzeugkonzepte vom Kunden nachgefragt werden, die über eine kontinuierliche Steigerung des Hybridisierungsgrads schließlich lokal emissionsfreies Fahren mit rein batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen und Brennstoffzellen-Fahrzeugen ermöglichen. Die zunehmende Produktionszahl der für elektrisches Fahren notwendigen Komponenten in Hybridfahrzeugen ermöglicht über Lernkurvenfunktionen und Skaleneffekte in der Massenfertigung letztendlich wettbewerbsfähige Preise.

Neben den Veränderungen, die sich aus der Weiterentwicklung konventioneller Verbrennungsmotor-Technologien ergeben, sind weitere Systeme zu betrachten, die im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs relevant werden. Diese Systeme umfassen diejenigen Technologien, die speziell für hybride Antriebskonzepte bis hin zum reinen Elektrofahrzeug nötig sind: Getriebe (Hybrid-Getriebe), elektrische Maschinen, Batterie-Systeme, Leistungselektronik und Brennstoffzellen-Systeme.

2.2.1 Verbrennungsmotoren



Fiat Twinair

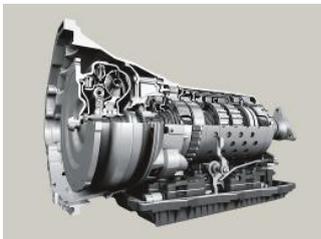
Die Weiterentwicklung des konventionellen Verbrennungsmotors bietet große Potenziale zur Effizienzsteigerung, insbesondere über eine weitere Reduzierung von Wirkungsgradverlusten. Dieselmotoren bieten ca. 20% Optimierungspotenzial, Otto-Motoren ca. 30%. Insbesondere durch das zukünftig verstärkt durchgeführte Downsizing von Verbrennungsmotoren ergeben sich veränderte Anforderungen in Bezug auf Packageräume, Bauteileanzahl und -komplexität.

So wird beispielsweise der notwendige Bauraum durch kleiner dimensionierte Motoren mit weniger Zylinder verringert, aber durch die oftmals gleichzeitig genutzte Aufladung aufwändige Turbo- und Kompressorsysteme eingesetzt, die im Motorraum installiert werden müssen.

Verschiedene Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Technologien werden zur Zeit verfolgt, darunter u.a.

- Steigerung des Wirkungsgrads, z.B. durch optimierte Verbrennung, verbesserte (Direkt-) Einspritzung, Aufladung und Downsizing
- Energiemanagement, z.B. durch Nutzung von Abwärme
- Antriebsstrangoptimierung, z.B. durch Reduktion Reibungswiderstände, Optimierung Getriebespreizung, Direktschaltgetriebe
- Abgasrückführung und -nachbehandlung

2.2.2 Getriebe



ZF 8-Gang Automatikgetriebe

Die Hauptaufgabe des Getriebes liegt in der Drehmoment-/ Drehzahlwandlung zur Anpassung der Motorkennlinie zu den Fahrwiderständen, zum Befahren von Steigungen und zum Beschleunigen des Fahrzeugs. Neben dem konventionellen Handschaltgetriebe (MT) existieren Automatikgetriebe (AT) und automatisierte Schaltgetriebe (AMT) in Form von Doppelkupplungsgetrieben.

Im Zuge der zukünftigen Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden Automatikgetriebe zunehmend an Bedeutung gewinnen. Ein wesentlicher Trend bei hybridisierten Fahrzeugkonzepten ist die Entwicklung von Bauraum- und Package-optimierten Hybridgetrieben mit integrierter elektrischer Maschine.

Dabei werden in naher Zukunft Getriebe mit höherer Gangzahl (8- bis 9-Gang-Getriebe) eingesetzt, um den Verbrennungsmotor über möglichst weite Bereiche im Betriebsoptimum betreiben zu können und Verbrauchsvorteile zu erzielen. Eine darüber hinausgehende Steigerung der Gangzahl ist jedoch nicht zu erwarten. Der Trend zu immer mehr Gängen weicht so zunehmend einer weiteren Spreizung der Gänge. Die Optimierung von Reibungsverlusten ist ein weiterer Treiber der Entwicklungen.

Bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen könnte das Getriebe in Zukunft sowohl stufenlos, als auch ein- oder zweistufig ausgelegt sein. Zur Realisierung unterschied-

licher Drehzahlkonzepte werden zweistufige Getriebe voraussichtlich bevorzugt eingesetzt werden. Diese erlauben sowohl ein hohes Anfahrmoment zur Beschleunigung als auch erhöhte Spitzengeschwindigkeiten.

2.2.3 Elektrische Maschinen



Bosch Elektromotor

Im Bereich der Elektromotoren lassen sich grundsätzlich vier Funktionsweisen unterscheiden:

- Gleichstrommotor
- Asynchronmotor
- Synchronmotor
- Reluktanzmotor

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Eigenschaften der unterschiedlichen Motorentypen zusammen.

Permanent erregte Synchronmotoren bieten einen hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig guter Leistungsdichte und thermischer Stabilität und sind daher im automobilen Einsatz in der Regel die bevorzugte Wahl. Nachteilig zeigen sich die hohen Materialkosten, die insbesondere auf die bei der Herstellung der Permanentmagnete eingesetzten Seltenen Erden (z.B. Neodym) zurückzuführen sind. Steigen die Rohmaterialpreise weiter werden voraussichtlich verstärkt Asynchronmotoren eingesetzt, welche keine Permanentmagnete enthalten.

	Gleichstrom		Synchron		Asynchron	Reluktanz
	Elektr. erregt	Perm. erregt	Elektr. erregt	Perm. erregt		
Leistungsdichte	o	+	+	++	+	++
Zuverlässigkeit	o	+	+	+	++	++
Wirkungsgrad	--	-	+	++	o	+
Regel-/Steuerbarkeit	++	++	+	+	o	++
Überlastbarkeit	+	+	+	+	+	+
Geräuschpegel	-	-	+	+	+	+
Thermischer Überlastungsschutz	-	-	+	++	+	+
Entwicklungsstand		++	o	o	+	o

Tabelle 1: Übersicht E-Maschinen (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2010)

In der zukünftigen Entwicklung wird insbesondere daran gearbeitet die Effizienz von Traktionsmotoren von heute 90-95% weiter zu steigern. Daneben wird an einer Verbesserung der Leistungsdichte bzw. der Größe von elektrischen Maschinen gearbeitet, was für Packaging und Gewicht des Fahrzeugs von großer Bedeutung ist. Ziel ist es, die Energiedichte von heute ca. 2kW/kg auf bis zu 5 kW/kg zu steigern. Eine große Herausforderung besteht darin, Elektromotoren, die in der Vergangenheit meist für industrielle Anwendungen entwickelt wurden, für die geforderten Spezifikationen im automobilen Umfeld anzupassen. Dies beinhaltet insbesondere hohe Anforderungen im Bereich Dauerhaltbarkeit, Temperaturbeständigkeit, Wartungsfreiheit und Lebensdauer. Auf der Kostenseite gilt es insbesondere die Produktionsprozesse für die Wicklung und Magnetisierung weiter zu verbessern sowie den Materialeinsatz weiter zu optimieren, der mit ca. 60% den Hauptkostentreiber darstellt.

2.2.4 Batterie-Systeme



Chevrolet Volt Batteriesystem

Die wohl größte technische Herausforderung bei der Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs liegt in der Entwicklung leistungsfähiger und zugleich kostengünstiger Batteriesysteme.

Bei der Wahl eines Energiespeichersystems sind die folgenden systembedingten Eigenschaften von hoher Bedeutung:

- Energiedichte (Wh/kg bzw. Wh/l)
- Leistungsdichte (W/kg bzw. W/l)
- Kapazität (Ah)
- Kalendarische Lebensdauer
- Zyklenlebensdauer
- Ladegeschwindigkeit

Insbesondere die im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen geringe Energiedichte heutiger Akkumulatoren von 100-150 Wh/kg¹ hat große Auswirkungen auf Fahrzeuggewicht, Packaging und Reichweite. Abbildung 4 stellt die für 100 km Reichweite benötigte Masse bzw. Volumen für unterschiedliche Energiespeicher exemplarisch gegenüber. Um dieses Problem zu lösen wird aktuell an eine Vielzahl unterschiedlicher Elektrolyt-, Anoden- und Kathodenmaterialien geforscht. Das größte Potential wird kurz- bis mittelfristig Batteriesystemen auf Lithium-Ionen-Basis (Li-Ion) eingeräumt.

Über die Wahl der Zellchemie lassen sich die Charakteristika der Batterie gezielt beeinflussen. So weisen beispielsweise Lithiumnickelkobalt-Batterien eine hohe Energiedichte, aber eine niedrige Leistungsdichte auf. Lithiumtitanat bietet gute Zyklenfestigkeit und hohe Leistungsdichte, aber lässt sich nur zu verhältnismäßig hohen Kosten realisieren. Als wichtigstes Kathodenmaterial kann aktuell Lithiumeisenphosphat (LiFePO₄) genannt werden, das bei geringen Kosten eine hohe Leistungsdichte, kurze Ladezeiten sowie gute Sicherheitseigenschaften bietet (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2010). Welche Materialkombinationen sich langfristig durchsetzt ist noch offen, auch an Lithium-Metall/Schwefel und Lithium-Metall/Luft Zellen wird intensiv geforscht.

¹ Zum Vergleich: Benzin hat eine Energiedichte von 12.080 Wh/kg.

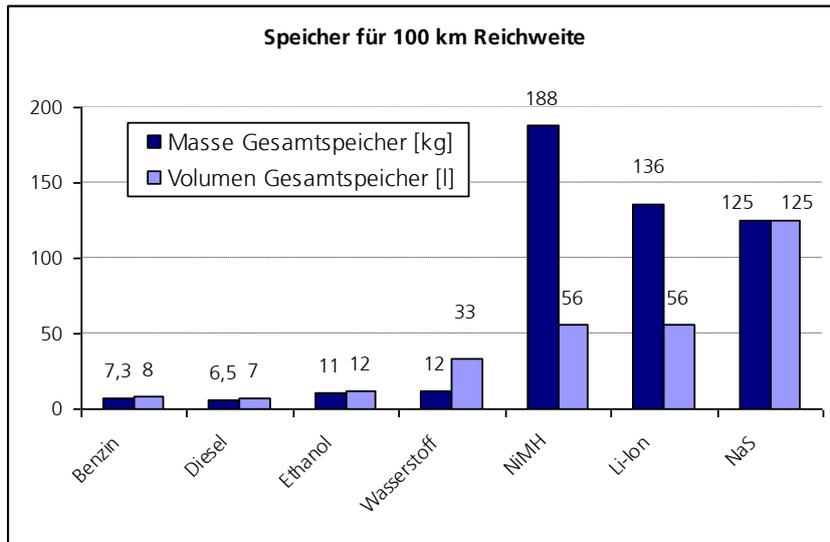
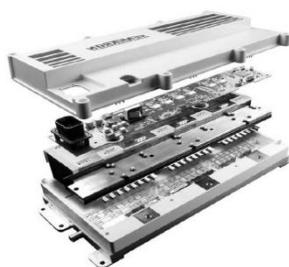


Abbildung 4: Masse und Volumen verschiedener Speichersysteme für 100km Reichweite¹ (Hofmann P. , 2010)

Grundsätzlich sind drei unterschiedliche Bauformen für Li-Ionen-Zellen gebräuchlich: zylindrisch, prismatisch und sog. „Pouch-“ oder „Coffee-Bag-Zellen“ mit einer flexiblen Außenhülle. Die letztgenannte Bauform wird aufgrund niedriger Materialkosten, hoher Energiedichte und guter Kühlungseigenschaften voraussichtlich zukünftig bevorzugt eingesetzt.

Neben den genannten Anforderungen an die technische Leistungsfähigkeit besteht auch in den Bereichen (Crash-)Sicherheit, Thermomanagement und Recycling großer Forschungsbedarf. Ziel ist es, leistungsfähige, zuverlässige und umweltverträgliche Batterien zu entwickeln, deren Kosten langfristig unter 200 EUR/kWh liegen.

2.2.5 Leistungselektronik



Leistungselektronik

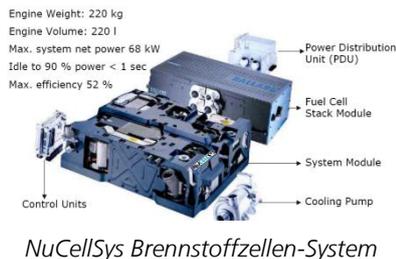
Die Hauptaufgabe der Leistungselektronik ist es, den von der Traktionsbatterie gelieferten Gleichstrom in einem DC/AC-Wandler in Dreiphasen-Wechselstrom zum Antrieb des Elektromotors umzuwandeln. Mittels Puls-Weiten-Modulation (PWM) werden Spannung und Frequenz und damit der Stromfluss in der elektrischen Maschine geregelt. Moderne Umrichter sind hocheffizient (Wirkungsgrad ~97%), langlebig und wartungsfrei, so dass die Leistungselektronik grundsätzlich als reife Technologie bezeichnet werden kann.

Von Seiten der Fahrzeugarchitektur wird eine wirkungsortnahe Systemintegration der Leistungselektronik angestrebt. Das heißt die räumliche Distanz zwischen Leis-

¹ NiMH: Nickel-Metallhydrid; Li-Ion: Lithium-Ionen; NaS: Natriumsulfid

tungselektronik und Motor soll möglichst minimiert werden, was zu einer geringeren Anzahl geschirmter Hochvoltkabel, verbesserter EMV, niedrigeren Kosten und Zusatzgewicht führt. Die Entwicklung geht in Richtung Systemintegration der Leistungselektronik innerhalb der E-Maschine, was zu Kosten- und Gewichtsreduktion führt. Teilweise kommt neben dem DC/AC-Wandler ein DC/DC-Wandler zur Stabilisierung der Traktionsspannung und Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades zum Einsatz. Herausforderungen bestehen weiterhin in der Steigerung der Leistungsdichte durch integrierte Bauweise, leistungsfähigere aktive und passive Bauelemente sowie optimierte Schaltungstopologien. Zudem wird versucht die thermische Stabilität durch effiziente Wärmeabführung und Direktkühlung weiter zu verbessern.

2.2.6 Brennstoffzellen-Systeme



Bei der im Automotive-Bereich eingesetzten Brennstoffzelle handelt es sich meist um eine wassergekühlte Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM). Als Wasserstofftank werden meist Drucktanks, aber auch Metallhydridspeicher eingesetzt. Zur Kühlung des Brennstoffzellenstacks wird ein zusätzlicher Kühlkreislauf benötigt.

Wasserstoff kann mit hohem Wirkungsgrad in Niedertemperaturbrennstoffzellen oder in Hochtemperaturbrennstoffzellen in elektrische Energie umgesetzt werden. Bezogen auf die Brennstoffzellentechnologien weisen PEM, die bei 80°C betrieben werden, den höchsten Entwicklungsstand auf und sind in Leistungsklassen von einigen Watt bis etwa 250 kW demonstriert worden. Für Gesamtsysteme bestehen besondere Herausforderungen bezüglich Wärme- und Wassermanagement, Kosten und Dynamik. Hochtemperaturbrennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen zwischen 140 und 200 °C und nutzen Membranen, die keine Befeuchtung erfordern. Entsprechend lassen sich hierfür folgende Vorteile ableiten:

- Erhöhte Energiedichte (Wh/kg bzw. Wh/l)
- Systemvereinfachung durch Wegfall von Befeuchtungsmaßnahmen
- Verbesserte Kinetik der Elektrodenreaktionen durch höhere Betriebstemperatur
- Senkung der Kosten durch geringeren Edelmetallkatalysatoraufwand
- Betrieb mit Reformat anstelle von hoch reinem Wasserstoff aufgrund der höheren CO-Toleranz
- Bessere Möglichkeit der Wärmeauskopplung durch die höhere Arbeitstemperatur

2.2.7 Weitere Entwicklungen

Um dem steigenden Fahrzeuggewicht durch die Elektrifizierung des Antriebs und der damit verbundenen Verschlechterung der fahrdynamischen Eigenschaften entgegenzuwirken, werden **Leichtbauweisen** (z.B. Spant- oder Spaceframe-Bauweise) sowie der Einsatz innovativer Materialien (wie Magnesium und CFK) zunehmend an Bedeutung gewinnen. Ein Beispiel hierfür ist das aktuell von BWM entwickelte Megacity Vehicle, das 2013 in den Markt eingeführt werden soll. Das Stadtauto wird als erstes batterieelektrisches Serienfahrzeug eine Karosserie aus kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK) aufweisen, was zu einer Gewichtseinsparung von ca. 100 kg führt. Zwar ist CFK ca. 50% leichter als Stahl und 30% leichter als Aluminium, allerdings ist es deutlich aufwändiger und damit kostenintensiver in der Herstellung. Die Hauptherausforderung besteht an dieser Stelle in der Entwicklung effizienter Pro-

duktionsprozesse, die eine Massenproduktion von CFK-Bauteilen ermöglichen und durch die damit verbundenen Skaleneffekten die Kosten signifikant reduzieren. Die Zusatzkosten durch CFK für 1 kg Gewichtseinsparung betragen heute über 50 EUR/kg, bei Massenproduktion können ca. 10 EUR/kg realisiert werden.

2.3 Auswahl von Antriebsarchitekturen für die weitere Untersuchung

Im Folgenden werden die für die weitere Untersuchung notwendigen Antriebsarchitekturen der Referenzfahrzeuge festgelegt. Dies umfasst in einem ersten Schritt die Definition eines Referenzfahrzeugs für jedes dieser Untersuchung zugrundeliegende Fahrzeugkonzept (Mild Hybrid Electric Vehicle (Mild-HEV), Full-/ Plug-In Hybrid Electric Vehicle (HEV), Battery Electric Vehicle (BEV), Range-extended Electric Vehicle (REX) und Fuel Cell Vehicle (FCV)) hinsichtlich relevanter Eigenschaften wie Fahrzeuggröße, -gewicht und -leistung. Ziel dabei ist es, die einzelnen Fahrzeugkonzepte so darzustellen, dass unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger Technologie- und produktionsrelevanter Veränderungen vergleichende Aussagen zu Beschäftigungswirkungen abgeleitet werden können. In einem zweiten Schritt werden alle relevanten Systeme und Komponenten, die im Rahmen der zunehmenden Elektrifizierung heutiger und zukünftiger Fahrzeugkonzepte voraussichtlich genutzt und produziert werden, für jedes definierte Referenzfahrzeug festgelegt.

Im Hinblick auf die übergeordneten Ziele des Projekts ELAB sind dabei v.a. diejenigen Systeme und Komponenten detailliert zu betrachten, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion heute schon produziert werden und zu einem zukünftig möglichen Produktionsspektrum zählen können sowie zudem Veränderungen sowohl in der genutzten Produktionstechnologie als auch in den einzelnen Fertigungsschritten und in den Montageabläufen im Vergleich zum heutigen Stand bedingen.

Für die in späteren Arbeitspaketen durchzuführende Quantifizierung und Modellierung des zukünftigen Volumens der Beschäftigung und das Qualifizierungsniveau der Beschäftigten sind im Hinblick auf das Antriebskonzept somit verschiedene Fragen zu beantworten:

- Welches sind wahrscheinliche Fahrzeug- und Antriebskonzepte der nahen Zukunft? Wie sind diese auf Systemebene aufgebaut?
- Welche Komponenten werden im Fahrzeug verbaut und können in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion der nahen Zukunft produziert werden?
- Welche Bauteile benötigen die Komponenten? Wie hoch ist deren Anzahl und wie komplex deren Aufbau?
- Welche Werkstoffe und Fertigungstechnologien sind für diese Bauteile notwendig?
- Welche Prozessschritte sind zur Fertigung in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion notwendig und welche Montagearbeiten werden durchgeführt?

2.4 Explorative Analyse der Bauteilvielfalt

In einem ersten Schritt wird eine Analyse des Ist-Zustands ausgewählter Fahrzeug- und Antriebskonzepte durchgeführt. Das Ziel liegt darin, einen Ausschnitt der aktuellen Marktsituation alternativer Antriebskonzepte darzustellen und qualitative Aussagen zu treffen, inwiefern die Leistungswerte der einzelnen Fahrzeugkonzepte Einfluss haben auf die Beschäftigungs-relevante Komplexität und Anzahl der Bauteile.

Für die explorative Marktanalyse wurden insgesamt 62 Fahrzeuge untersucht, die zur Zeit am Markt erhältlich sind (insbesondere Hybrid-Fahrzeuge) oder sich in einer marktnahen Entwicklung befinden (insbesondere Batterie-elektrische Fahrzeuge, Brennstoffzellen-Fahrzeuge). Das Detaillierungsniveau der Analyse wurde zielorientiert gewählt und korreliert dementsprechend mit dem Fokus der Untersuchung: denjenigen Komponenten, die aufgrund ihres relativen Wertschöpfungsanteils am Fahrzeug Relevanz besitzen sowie in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion heute produziert oder zukünftig hergestellt werden können:

- Elektrische Maschinen (E-Motor, Generator)
- Getriebe (CVT-Getriebe, Hinterachsgetriebe, Differential, Drehzahlreduktions-Planetensätze)
- Gehäuse (Verbrennungskraftmaschinengehäuse, Getriebegehäuse, Hinterachsgetriebegehäuse, Differentialgehäuse)
- Wellen + Zahnräder (Kurbelwelle, Achswelle, Vorgelegewelle, elektrische Antriebswelle, Planetenradsätze)
- Kupplungen
- Brennstoffzellen-Stacks

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Untersuchte Fahrzeuge ▪ Fokus der Betrachtung: v.a. Serienfahrzeuge (HEV), Prototypen (BEV, FCV) ▪ Untersuchte Komponenten/ Bauteile ▪ E-Maschinen Getriebe Gehäuse Wellen Zahnräder Kupplungen 	HEV	BEV	FCV
	BMW X6 Active Hybrid	Audi A1 e-tron	Chrysler Jeep Treo
	Cadillac Escalade 2Mode	Chevrolet Volt	Fiat Panda Hydrogen
	Ford Escape Hybrid	Citroen C-Zero	Ford Focus FCV
	GMC Yukon Hybrid	Dodge ZEO	GM Equinox
	Honda Civic Hybrid 1.3	Fiat Phylla	GM Hydrogen 3 (Zafra)
	Honda Insight Hybrid 1.3	Ford e-Ka	GM Sequel
	Lexus GS450h	GM EV1 Generation 2	Honda FCX-V4
	Lexus HS250h	Lightning GT	KIA Sportage
	Lexus LS600h	Mercedes A-Klasse ELECTRIC	Mazda Premacy FC-EV
	Lexus RX400h	Mini E	Mercedes F 600 HYGЕНИUS
	Lexus RX450h	Mitsubishi Colt EV MIEV	Mercedes F-Cell B-Klasse
	Mazda Tribute HEV	Mitsubishi i-MiEV	Mitsubishi Grandis FCV
	Mercedes ML 450 Hybrid	Mitsubishi Lancer MIEV	Nissan X-Trail FCV
	Mercedes S400 Hybrid	Nissan Leaf	Toyota FCEV
	Nissan Altima Hybrid	Nissan Nuva	VW Touran HyMotion
	Peugeot 3008 Hybrid4 (Diesel)	Opel Ampera	
	Porsche Cayenne S Hybrid	Peugeot iOn	
	Saturn Vue Greenline 2 Mode	Renault Kangoo bebop ZE	
	Saturn Vue Greenline Hybrid	Ruf ER Modell A	
	Toyota Camry Hybrid	Smart Fortwo ed	
	Toyota Estima Hybrid	Subaru G4e Concept	
	Toyota Prius III	Tesla Model S	
		Tesla Roadster	
		Toyota FT-EV	
		Venturi Volage	

Abbildung 5: Betrachtete Fahrzeuge der explorativen Marktanalyse (Grafik: DLR)

Sofern Informationen zu beschaffen waren, wird zum Zwecke der Definition zukünftiger Referenzfahrzeuge auch die jeweilige Antriebsarchitektur der Fahrzeugkonzepte erfasst, so dass auch hier über die Abbildung der Ist-Situation mögliche Trenddarstellungen abgeleitet werden können.

Die Ergebnisse der Analysen werden nach Fahrzeugkonzept gegliedert (HEV, BEV, FCV) und für die folgende Auswertung nach der Leistungsklasse (Systemleistung) aufsteigend sortiert.

		Hybrid-Fahrzeuge (in Serie)																						
Technologie/ Anzahl Komponenten		Honda Insight Hybrid 1.3	Honda Civic Hybrid 1.3	Toyota Prius III	Mazda Tribute HEV	Ford Escape Hybrid	Lexus HS250h	Saturn Vue Greenline Hybrid	Toyota Camry Hybrid	Toyota Estima Hybrid	Peugeot 3008 Hybrid4 (Diesel)	Nissan Altima Hybrid	Lexus RX400h	Mercedes S400 Hybrid	Lexus RX450h	GMC Yukon Hybrid	Cadillac Escalade 2Mode	Lexus GS450h	Mercedes ML 450 Hybrid	Saturn Vue Greenline 2 Mode	Lexus LS600h	BMW X6 Active Hybrid	Porsche Cayenne S Hybrid	
Systemleistung kW		72	81	99	114	132	137	137	137	140	147	148	200	200	220	235	248	250	250	250	327	356	380	
Nennleistung E-Motor		1	10	15	60	69	70	102	5	105	105	28	29	123	15	174	50	60	147	67	55	165	67	35
		2											50		67	50	60		63	55		67		
Antriebskonzept																								
Serienell																								
Parallel		X	X		X		X	X		X	X	X		X		X	X		X	X		X	X	
Kombiniert				X		X							X		X			X			X		X	
Micro								X																
Mild		X	X											X										
Full				X	X	X	X		X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Plug-In																								
E-Maschine		1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		2			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		3									X		X											
		4																						
Getriebe																								
CVT-Getriebe		X	X			X																		
Hinterachsgetriebe													X	X										
Differential		1	X	X	X	X	X						X	X						X			X	X
		2											X							X			X	X
Drehzahred.-planetenstanz													X										X	X
Gehäuse																								
VKM		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Getriebe		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hinterachsgetriebe													X	X										
Differential		1	X	X	X		X						X	X						X			X	X
		2					X						X							X			X	X
Wellen + Zahnräder																								
Kurbelwelle		X	X	X		X							X	X			X		X	X		X	X	
Achswelle		1	X	X	X	X							X	X			X		X	X		X	X	
		2																		X			X	X
Vorgelegewelle		1	X	X		X							X											
		2			X								X											
Elektr. Antriebswelle		1	X	X	X		X						X											
		2											X											
Planetenstätze		1											X						X	X			X	X
		2																	X	X			X	X
		3																		X	X			X
		4			X								X							X	X			X
Kupplung		1	X	X	X		X						X	X			X		X	X		X	X	
		2																		X	X			X
		3																		X	X			X
		4																		X	X			X

Tabelle 2: Bauteilvielfalt Hybridfahrzeuge

Die Analyse der Marktsituation von 22 derzeit hauptsächlich serienreifen Hybridfahrzeugen zeigt, dass Unterschiede in Teileanzahl und -komplexität für unterschiedliche Leistungsklassen existieren. Während Fahrzeuge im unteren Systemleistungsbereich (bis ca. 115kW) eine durchschnittliche Teileanzahl von 11-13 besitzen, steigt diese bei Fahrzeugen mit einer Systemleistung über 200kW auf 15-22 an. Die Gründe für die unterschiedliche Teilevielfalt im Antriebsstrang sind dabei insbesondere auf die verwendete komplexere Getriebe zurückzuführen. Die mit Abstand am meisten genutzte Antriebsarchitektur der untersuchten Hybridfahrzeuge ist der Parallel-Hybrid (P2).

		Batterie-Fahrzeuge																										
Technologie/ Anzahl Komponenten		Mitsubishi Colt EV MIEV	Smart Fortwo ed	Mitsubishi i-MIEV	Peugeot iOn	Citroen C-Zero	Mercedes A-Klasse ELECTRIC	Fiat Phylla	Nissan Nuvu	Subaru G4e Concept	Ford e-Ka	Audi A1 e-tron	Nissan Leaf	GM EV1 Generation 2	Chevrolet Volt	Opel Ampera	Renault Kangoo bebop ZE	Mini E	Ruf ER Modell A	Tesla Roadster	Dodge ZEO	Mitsubishi Lancer MIEV	Venturi Voltage	Lightning GT	Tesla Model S	Toyota FT-EV		
Nennleistung kW		20	30	47	47	47	50	54	60	65	65	75	80	102	110	110	150	150	152	185	200	200	220	480				
Antriebskonzept																												
Radnabenmotor		X																					X	X	X			
Radnahe Motoren																												
Zentraler Motor			X	X	X			X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
E-Maschine																												
1		X	X	X	X			X	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
2		X																										
3																												
4																												
Getriebe																												
CVT-Getriebe																												
Hinterachsgetriebe																												
Differential		1		X	X						X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
2																												
Drehzahlred.-planetensatz		X		X	X						X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
Gehäuse																												
Getriebe			X	X							X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
Hinterachsgetriebe																												
Differential		1		X	X						X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
2																												
Wellen + Zahnräder																												
Kurbelwelle																												
Achswelle		1		X	X						X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
2			X	X							X		X	X	X	X	X	X	X	X	X					X		
Vorgelegewelle		1																										
2																												
Elektr. Antriebswelle		1																										
2																												
Planetersätze		1																										
2																												
3																												
4																												

Tabelle 3: Bauteilvielfalt Batteriefahrzeuge

Bei den 25 untersuchten Elektrofahrzeug-Konzepten und -Prototypen (BEV) ist die Teilevielfalt im Antriebsstrang näherungsweise nicht abhängig von der Leistungsklasse. Sie liegt bei allen derzeitigen Fahrzeugkonzepten mit zentral verbautem Motor bei 6-7. Werden die elektrischen Maschinen nicht zentral im Fahrzeug verbaut, wie derzeit bei der Mehrzahl der untersuchten Fahrzeuge als Antriebsarchitektur realisiert, sondern als Radnabenmotoren im Rad selbst, sinkt die Teilevielfalt dementsprechend im Durchschnitt auf 4. Radnabenmotoren wurden jedoch nur bei besonders exotischen Konzeptstudien wie dem Lightning GT oder dem Venturi Voltage verbaut.

		Brennstoffzellen-Fahrzeuge														
		Fiat Panda Hydrogen	GM Hydrogen 3 (Zafira)	Mercedes F-Cell B-Klasse	Ford Focus FCV	Honda FCX-V4	KIA Sportage	VW Touran HyMotion	Mercedes F 600 HYGENIUS	Nissan X-Trail FCV	Toyota FCEV	GM Equinox	GM Sequel	Chrysler Jeep Treo	Mazda Premacy FC-EV	Mitsubishi Grandis FCV
Technologie/ Anzahl Komponenten		50	60	65	68	80	80	80	85	90	90	94	115			
Nennleistung kW																
Antriebskonzept																
	Radnabenmotor												X			
	Radnahe Motoren													X		
	Zentraler Motor					X				X	X	X	X			
E-Maschine	1			X		X		X		X	X	X	X	X		
	2												X	X		
	3												X			
	4															
Getriebe																
	CVT-Getriebe															
	Hinterachsgetriebe															
	Differential	1		X				X		X	X	X	X			
	2															
	Drehzahlred.-planetensatz												X			
Gehäuse																
	Getriebe												X			
	Hinterachsgetriebe															
	Differential	1		X				X		X	X	X	X			
	2															
Wellen + Zahnräder																
	Kurbelwelle															
	Achswelle	1		X				X		X	X	X	X			
	2			X				X		X	X	X	X			
	Vorgelegewelle	1														
	2															
	Elektr. Antriebswelle	1														
	2															
	Planetensätze	1														
	2															
	3															
	4															
Brennstoffzellenstack																
	Endplatten	2	2	4	8	2	2									
	Bipolarplatten	384	440	400	440											

Tabelle 4: Bauteilvielfalt Brennstoffzellenfahrzeuge

Bei Vernachlässigung einer möglichen eigenen Brennstoffzellen-Stack-Produktion im Aggregatewerk ist die Bauteilvielfalt der 15 untersuchten Brennstoffzellen-Fahrzeuge vergleichbar mit der von Batterie-betriebenen Elektrofahrzeugen. Die Leistungsklasse hat dabei wiederum keinen Einfluss auf die Teilevielfalt im Antriebsstrang. Sie liegt im Durchschnitt näherungsweise bei 5 Komponenten je Fahrzeug. Eine detaillierte Untersuchung wurde durch den sensiblen Aufbau der innovativen Brennstoffzellen-Fahrzeugkonzepte und dementsprechend wenig offiziell einsehbareren Datensätzen erschwert.

Generell kann somit in der folgenden Untersuchung davon ausgegangen werden, dass die Leistungsklasse bei den betrachteten Fahrzeugkonzepten zum heutigen Zeitpunkt näherungsweise keinen Einfluss auf die Bauteilvielfalt im Antriebsstrang hat. Anzahl und Komplexität der Bauteile – als produktionsrelevantes Kriterium mit Einfluss auf mögliche Beschäftigungswirkungen in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion – sind bei den untersuchten Fahrzeugen dementsprechend unabhängig von der jeweiligen Systemleistung. Die Bauteilvielfalt variiert nur bei den Hybrid-Antriebssträngen in Abhängigkeit von der Leistungsklasse. Diese Varianz ist jedoch grundsätzlich auf das eingesetzte Getriebe zurückzuführen. Dem soll so Rechnung getragen werden, dass zusätzlich zu den einmalig zu definierenden Referenz-Batterie- und -Brennstoffzellenfahrzeug-Konzepten im Weiteren zwei unterschiedliche Referenz-Hybridantriebskonzepte definiert und die Ergebnisse in den in Kapitel 4 folgenden Bauteilanalysen über die Untersuchung von Sensitivitäten in der

Architektur und den eingesetzten Komponenten abgebildet werden. Die Ergebnisse der explorativen Marktanalyse fließen in die folgende Definition der Referenz-Antriebsstränge ein.

2.5 Definition der Referenz-Antriebskonzepte

Für eine repräsentative Definition zukünftig möglicher und wahrscheinlicher Antriebskonzepte wird im Folgenden von einer einheitlichen Systemleistung der Fahrzeuge ausgegangen. Die zugrundeliegende Leistung wird hinsichtlich der Relevanz für den globalen Fahrzeugmarkt und in enger Abstimmung mit den Projektpartnern gewählt und auf ca. 100 kW festgelegt. Sie ist als Nennleistung am Antriebsrad definiert und umfasst somit die tatsächliche Leistung zum Vortrieb des Fahrzeugs, die entstehende Verluste z.B. im Motor, der Kurbelwelle und der Kupplung in den individuellen Referenz-Antriebssträngen der einzelnen Fahrzeugkonzepte berücksichtigt.

Die Definition eines konventionellen Referenz-Antriebsstrangs mit ca. 100 kW am Rad erfolgt für das Kompaktwagen-Segment, da produktionsrelevante Änderungen aufgrund der globalen Stückzahlen größte unmittelbare Auswirkungen sowohl auf die Beschäftigung selbst als auch auf die Qualifizierung der Beschäftigten in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion haben.

Ausgehend von einem konventionellen Fahrzeugkonzept, das dem heutigen Stand der Technik (2010) entspricht, rein verbrennungsmotorisch betrieben wird, 100 kW Nennleistung am Rad besitzt und dem Kompaktwagensegment zuzuordnen ist (ca. 1200-1600kg Gewicht), wird die Referenz-Fahrleistung auf die alternativen Antriebskonzepte (Hybrid-, Batterie und Brennstoffzellen-Fahrzeuge) übertragen und in die Zukunft projiziert (2030), um so auch deren zukünftige Antriebsstränge realitätsnah auszulegen, zu simulieren und eine detaillierte Analyse aller verbauten Systeme, Komponenten und Bauteile zu ermöglichen. Ziel ist es somit, eine technologische Vergleichbarkeit der Fahrzeugkonzepte im Jahr 2030 herzustellen, die eine produktionsrelevante Analyse der verbauten Komponenten ermöglicht, um so über die Abbildung von Herstell- und Montageprozessen die Quantifizierung der im Rahmen der Elektrifizierung der Antriebsstränge entstehenden Beschäftigungswirkungen zu erlauben.

Als konventionelles Referenzfahrzeug im Jahr 2010 wird ein Golf VI 1.4 TSI mit 118 kW gewählt. Zusätzlich zu den sich durch die vordefinierten Leistungswerte der alternativen Fahrzeugkonzepte ergebenden Antriebssträngen, sollen die in Kapitel 2 dargestellten technologischen Entwicklungstrends in den Bereichen Verbrennungsmotor (ICE – Internal Combustion Engine), (Hybrid-) Getriebe, E-Maschine, Leistungselektronik, Batterie- und Brennstoffzellen-Systeme herangezogen und in die Definition der zukünftigen Referenz-Fahrzeuge im Jahr 2030 einbezogen werden. Die Vorgehensweise zur Definition der einzelnen Referenzfahrzeuge ist in folgender Abbildung zusammengefasst:

Leistungsdaten	ICE		Mild-HEV	HEV	REX	BEV	FCV	
	Beispielfahrzeug 2010	VW Golf VI 1.4 TSI	VW Golf VI 2.0 TDI	Aquivalent Honda Civic 1.3	Aquivalent Toyota Prius III	Aquivalent Chevrolet Volt	Aquivalent Ford Focus BEV	Aquivalent Mercedes F-Cell B-Klasse
2010	Nennleistung (am Rad) (kW)	100	100	100	100	100	100	100
	Leistung E-Motor (kW)	--	--	20	60	111	100	100
	Leistung VKM (kW)	118	103	85	73	53	--	--
	Batterie (kWh)	--	--	1	2	16	23	1,4
	Beschleunigung (0-100 km/h)	9,5	9,3	12,1	10,4	9	k.A.	11,4
	V-max (km/h)	200	210	185	180	160	140	170
	Verbrauch (l/km)	6	4,8	4,6	4,1	1,6 (4,8 mit VKM)	0	3,3
	Reichweite (km)	600	850	850	950 (20 elektr.)	500 (65 elektr.)	120	400
	Gewicht (kg)	1300	1350	1370	1450	1600	1700	1800
	Co2 (Lokal g/km)	140	130	110	80	0 (100 Mit VKM)	0	0
Leistungsdaten	ICE		Mild-HEV	HEV	REX	BEV	FCV	
	Beispielfahrzeug 2030	VW Golf X Benzin	VW Golf X Diesel					
2030	Nennleistung (am Rad) (kW)	100	100	100	100	100	100	100
	Leistung E-Motor (kW)	--	--	25	55	110	100	100
	Leistung VKM (kW)	120	110	90	80	40	--	--
	Batterie (kWh)	--	--	2	10-15	20	25	2
	Beschleunigung (0-100 km/h)	8,5	8	9,5	9	8	9	10
	V-max (km/h)	210	220	190	190	160	150	180
	Verbrauch (l/km)	4	3,5	3,5	3	1,0 (3,0 mit VKM)	0	2
	Reichweite (km)	850	1100	1100	1200 (50 elektr.)	700 (120 elektr.)	170	800
	Gewicht (kg)	1200	1250	1300	1400	1500	1500	1600
	Co2 (Lokal g/km)	80	80	70	60	0 (50 Mit VKM)	0	0

Abbildung 6: Referenz-Antriebskonzepte 2010 – 2030 (Grafik: DLR)

Im Weiteren werden die definierten Referenz-Antriebskonzepte auf System-, Komponenten- und Bauteil-Ebene betrachtet. Ziel ist es letztendlich, alle relevanten Bauteile der Referenzfahrzeuge im Jahr 2030 zu identifizieren und detailliert abzubilden, um so die notwendige Grundlage und Datenbasis für die diesen Arbeitspaketen nachfolgenden Untersuchungen zu liefern.

Aufbauend auf den Referenz-Antriebskonzepten (AP1) und den Bauteilanalysen heutiger und möglicher zukünftiger elektrifizierter Fahrzeuge (AP2), können Produktionsprozesse konventioneller (AP3) und neuer Antriebsstrang-Komponenten (AP4) modelliert und qualifizierte Aussagen zu Beschäftigungswirkungen in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion gewonnen und quantifiziert werden.

Ausgehend von den einzelnen Referenz-Fahrzeugkonzepten werden dem jeweiligen Antriebsstrang zugrundeliegende idealtypische Systeme definiert und auf Bauteil-Ebene virtuell zerlegt. Dabei wird auf diejenigen Systeme fokussiert, die im Zuge der Elektrifizierung der Antriebsstränge herausragende Bedeutung haben und als Fokus der technologischen Entwicklung definiert wurden. Diese Systeme umfassen:

- System Verbrennungsmotor
- System Getriebe
- System Elektrische Maschine
- System Leistungselektronik
- System Batterie
- System Brennstoffzelle

Die im Rahmen der Untersuchung identifizierten neuen, modifizierten und wegfallenden Komponenten sind in folgender Abbildung zusammengefasst:

Fahrzeugkonzepte	ICE	Mild-HEV	HEV	REX	BEV	FCV
Komponenten	Veränderungen der Systeme bis 2030					
Verbrennungsmotor	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Entfällt
Starter & Lichtmaschine	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Entfällt
Abgasanlage	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Modifiziert
Kraftstoffversorgung	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Entfällt	Modifiziert
Getriebe	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert	Modifiziert/ Entfällt	Modifiziert/ Entfällt	Modifiziert/ Entfällt
Elektrische Maschine	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Batterie-System	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Leistungselektronik	n.V.	Neu	Neu	Neu	Neu	Neu
Brennstoffzellen-System	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	n.V.	Neu

Abbildung 7: Neue, modifizierte und entfallende Komponenten bis 2030 (Grafik: DLR)

2.5.1 Referenz-Fahrzeug Verbrennungsmotor - ICE

Das konventionelle Referenzfahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine (ICE) im Jahr 2010 besitzt einen 1.4l 4-Zylinder Benzin-Motor (Diesel als Vergleich in Klammer gegenübergestellt: 2.0 TDI, 103 kW) mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Das Getriebe ist als manuelles 5-Gang Handschaltgetriebe definiert, die Abgasanlage durch einen handelsüblichen Katalysator.

Die Beschleunigung 0-100km/h beträgt 9,5s (9,3s), die Höchstgeschwindigkeit 200km/h (210km/h), der EU-Norm-Verbrauch 6,0l/100km (4,8l/100km), die Reichweite 600km (850km), das Gewicht 1.300kg (1.350kg), der CO₂-Ausstoß lokal 140g/km (130g/km).

Bis zum Jahr 2030 ist insbesondere die weitere Steigerung und Optimierung der Energieeffizienz Treiber der technologischen Entwicklung. Der Fokus derjenigen Systeme, die die größten Stellhebel dafür bieten, sind die Verbrennungskraftmaschine und das Getriebe. Der Verbrennungsmotor im Jahr 2030 ist durch die Verwendung mehrere Technologien geprägt, die v.a. eine Senkung des Verbrauchs bei nahezu gleichbleibender Systemleistung ermöglichen: Verringerung der Zylinderzahl (2-4) bzw. Zylinderabschaltung, Direkteinspritzung, Optimierte Aufladung (Downsizing), Optimierte Lagerung, Tribologie, Variable Ventilsteuerung und Start-Stopp Funktionalitäten. Diese Technologien zur Optimierung des Verbrennungsmotors bieten insgesamt ein Potenzial zur Reduktion des Verbrauchs und der CO₂-Emissionen um ca. 25%. Das Getriebe wird von einem manuellen 5(-6)-Gang Schaltgetriebe hin zu einem 8-Gang Automatikgetriebe verändert, um den Motor in möglichst weiten Bereichen und Zeiträumen im Wirkungsgradoptimum zu betreiben. Weiteres Einsparpotenzial von bis zu 12% ist damit erzielbar. Die Abgasanlage ist geprägt durch einen weiter optimierten Katalysator sowie Abgasrückführungs- und -nachbehandlungssysteme, um Emissionswerte zu verbessern.

Werden diese Technologien zusammen mit weiteren Optimierungsmaßnahmen (Reduzierung Gewicht durch fortschrittlichen Leichtbau, Verbesserung der Aerodynamik und des cw-Werts, Nutzung von Leichtlaufreifen) im Fahrzeug eingesetzt, bietet das Referenzfahrzeug im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 8,5s (8,0s), Höchstgeschwindigkeit max. 210km/h (220km/h), EU-Norm-Verbrauch 4,0l/100km (3,5l/100km), Reichweite 850km (1.100km), Gewicht 1.200kg (1.250kg), CO₂-Ausstoß lokal 80g/km (80g/km).

Die relevanten Systeme des verbrennungsmotorischen Fahrzeugs im Jahr 2030 werden nachfolgend aufgezählt. Hervorgehoben sind diejenigen, die aufgrund Ihrer Bedeutung hinsichtlich der Wertschöpfung am Gesamtfahrzeug sowie als Fokus der technologischen Entwicklung bis zum Jahr 2030 für Beschäftigungswirkungen in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion von herausragender Relevanz sind (hier: „Verbrennungsmotor“ und „Getriebe“). Sie werden deshalb bis auf Komponenten-, Bauteil-, Werkstoff- und Fertigungsebene analysiert.

Als Teilergebnis dieser Analyse werden für jedes folgende Hauptsystem diejenigen Komponenten und Bauteile aufgezählt, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion Teil der Eigenfertigung sein könnten. Für eine vollständige Darstellung der Detail-Analyse sei auf den Anhang verwiesen.

Die Differenzierung zwischen Montage, Eigenfertigung und Zukauf beruht bei allen betrachteten Systemen im Rahmen dieser Studie auf Forschungsannahmen, nicht auf einer strategischen Make-or-Buy-Entscheidung.

- **Verbrennungsmotor**

(Kurbelwelle, Pleuel, Kolben, Motorblock, Zylinderkopf, Nockenwelle)

- Luftversorgung
- Abgasanlage
- Einspritzanlage
- Zündanlage
- Motorsteuergerät
- Starter-Generator

- **Getriebe**

(8-Gang-Automatikgetriebe – Pumpenrad, Turbinenrad, Leitrad, Wandlergehäuse, Planetenradsätze, Wellen, Getriebegehäuse)

- Kardanwelle
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- Kraftstofftank

2.5.2 Referenz-Fahrzeug Mild-Hybrid – Mild-HEV

Das Referenzfahrzeug Mild-Hybrid (Mild-HEV) im Jahr 2010 besitzt einen 1,3l 4-Zylinder Reihen-Verbrennungsmotor mit ca. 85kW und einen zusätzlichen Elektromotor mit ca. 20kW Leistung. Als Äquivalent für das Referenzfahrzeug wurde der Honda Civic 1.3 Hybrid gewählt. Das Getriebe ist als stufenloses CVT-Getriebe definiert, die Abgasanlage durch einen handelsüblichen Katalysator. Das Nickel-Metallhydrid (NiMH) Batteriesystem besitzt 1kWh Kapazität, Batteriezellen im Rundzell-Design und ist Luft-gekühlt. Die Architektur des Parallel-Hybrids nutzt eine Kupplung (P1).

Die Beschleunigung 0-100km/h beträgt 12,1s , die Höchstgeschwindigkeit 185km/h, der EU-Norm-Verbrauch 4,6l/100km, die Reichweite 850km, das Gewicht 1.370kg, der CO₂-Ausstoß lokal 110g/km.

Auch hier ist bis zum Jahr 2030 die Optimierung der Energieeffizienz Treiber der technologischen Entwicklung. Durch den Einsatz einer zusätzlichen elektrischen Maschine und eines Batteriesystems müssen jedoch weitere Technologietrends berücksichtigt werden, die in die Definition des zukünftigen Referenz-Mild-Hybrids einfließen. Der Verbrennungsmotor im Jahr 2030 (ca. 90kW) ist beim Mild-HEV wie beim konventionellen Referenzfahrzeug ICE durch die Verwendung der Technologien geprägt, die zur Senkung des Verbrauchs eingesetzt werden: Verringerung der Zylinderzahl (2-4) bzw. Zylinderabschaltung, Direkteinspritzung, Optimierte Aufla-

dung (Downsizing), Optimierte Lagerung, Tribologie und Variable Ventilsteuerung. Anstatt eines stufenlosen CVT-Getriebes wird ein 8-Gang Automatikgetriebe verbaut. Die Abgasanlage nutzt einen optimierten Katalysator, Abgasrückführungs- und Abgasnachbehandlungssysteme. Die elektrische Maschine ist als kompakter, Package-optimierter Synchronmotor ausgelegt, der den Verbrennungsmotor bei Beschleunigungsmanövern unterstützt (Boost-Funktion). Er hat eine Leistung von ca. 25kW. Das Batteriesystem ist relativ klein dimensioniert (2kWh), speichert die zum Vortrieb notwendige elektrische Energie und ermöglicht damit eine relativ geringe rein elektrische Reichweite (ca. 2 km). Auch Rekuperation (Bremsenergie rückgewinnung) wird ermöglicht. Es nutzt die Lithium-Ionen-Technologie und ist damit hinsichtlich Leistungs- und Energiedichten dem Nickel-Metallhydrid System überlegen. Das verwendete Rundzell-Design der Batterien wird aufgrund Kosten- und Produktionsvorteilen beibehalten. Die Kühlung des Batteriesystems wird weiterhin durch Luft realisiert. Die Architektur des Parallelhybrids nutzt zwei Kupplungen (P2), um Energieverluste durch das Mitschleppen des Verbrennungsmotors zu vermindern.

Das Referenzfahrzeug hat damit im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 9,5s, Höchstgeschwindigkeit 190km/h, EU-Norm-Verbrauch 3,5l/100km, Reichweite 1.100km, Gewicht 1.300kg, CO₂-Ausstoß lokal 70g/km.

Die relevanten Systeme des mild-hybridisierten Fahrzeugs im Jahr 2030 sind:

- **Verbrennungsmotor**
(Kurbelwelle, Pleuel, Kolben, Motorblock, Zylinderkopf, Nockenwelle)
- Luftversorgung
- Abgasanlage
- Einspritzanlage
- Zündanlage
- Motorsteuergerät
- Starter-Generator
- **Getriebe**
(8-Gang-Hybridgetriebe – Zweimassenschwungrad, Planetenradsätze, Wellen, Getriebegehäuse)
(Integrierte elektrische Maschine – Rotor, Stator, Gehäuse)
- Kardanwelle
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- Kraftstofftank
- **Traktionsbatterie**
(mit Batteriezellen im Rundzell-Design – Zell-Stack, Wandung/ Zellrahmen, Kühlapparat/ Behälter, Druckplatte, Verdampferplatte, Mechanische Verbinder, Modulgehäuse, Gesamtgehäuse/ Trog, Bodenplatte/ Träger, Anschlussplatte, Rahmen)
- **Leistungselektronik**
(Bodenplatte Leistungsmodul, Gehäuse Leistungsmodul, Gesamtgehäuse)

Zusätzlich zu den Systemen „Verbrennungsmotor“ und „Getriebe“ ist das „Batteriesystem“ und die „Leistungselektronik“ Fokus der Bauteilanalyse. Die Detail-Analysen der einzelnen Hauptsysteme befinden sich im Anhang.

2.5.3 Referenz-Fahrzeug Full-/ Plug-In-Hybrid – HEV

Das Referenzfahrzeug Full-/ Plug-In-Hybrid (HEV) im Jahr 2010 besitzt einen 1,8l 4-Zylinder Reihen-Verbrennungsmotor mit ca. 73kW und einen zusätzlichen Elektromotor mit ca. 60kW Leistung. Als Äquivalent für das Referenzfahrzeug wurde der

Toyota Prius III Hybrid gewählt. Das Getriebe ist als stufenloses CVT-Getriebe definiert, die Abgasanlage durch einen handelsüblichen Katalysator. Das Nickel-Metallhydrid (NiMH) Batteriesystem besitzt 2kWh Kapazität und Batteriezellen im prismatischen Design. Der Full-Hybrid nutzt eine kombinierte parallele und serielle Power-Split Architektur.

Die Beschleunigung 0-100km/h beträgt 10,4s, die Höchstgeschwindigkeit 180km/h, der EU-Norm-Verbrauch 4,1l/100km, die Reichweite 950km (2 rein elektrisch), das Gewicht 1.450kg, der CO₂-Ausstoß lokal 90g/km.

Neben den Optimierungen im Bereich Verbrennungskraftmaschine und Getriebe bis zum Jahr 2030, liegt der Fokus von Technologieentwicklungen beim Voll-Hybriden insbesondere auf dem Batteriesystem. Es ist davon auszugehen, dass alle Voll-Hybriden als Plug-In-Hybride angeboten werden und so ein externes Aufladen der Fahrzeug-internen Batterie ermöglichen. Das Batteriesystem muss für eine rein elektrische Reichweite von ca. 50-60km ausgelegt werden und ist dementsprechend groß dimensioniert (10-15kWh). Aufgrund Packaging- und Gewichts-Aspekten ist die Pouch-Batteriezelle beim Plug-In-Hybriden im Jahr 2030 das dominante Design. Sie nutzt die Lithium-Ionen-Technologie, das Batteriesystem ist wassergekühlt. Der Verbrennungsmotor ist durch die üblichen Technologieentwicklungen gekennzeichnet: Verringerung der Zylinderzahl (2-4) bzw. Zylinderabschaltung, Direkteinspritzung, Optimierte Aufladung (Downsizing), Optimierte Lagerung, Tribologie und Variable Ventilsteuerung. Auch beim Plug-In-Hybriden im Jahr 2030 wird anstelle des stufenlosen CVT-Getriebes ein 8-Gang Hybrid-Automatikgetriebe verbaut. Die Abgasanlage nutzt einen optimierten Katalysator, Abgasrückführungs- und Abgasnachbehandlungssysteme. Die elektrische Maschine hat eine Leistung von ca. 55kW. Die Architektur des Parallelhybrids nutzt zwei Kupplungen (P2).

Das Referenzfahrzeug hat damit im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 9,0s, Höchstgeschwindigkeit 190km/h, EU-Norm-Verbrauch 3,0l/100km, Reichweite 1.200km (50 rein elektrisch), Gewicht 1.400kg, der CO₂-Ausstoß lokal 60g/km.

Neben dem Verbrennungsmotor, dem Batteriesystem im Pouch-Zell-Design und der Leistungselektronik ist das System „Getriebe“ in zwei unterschiedlichen Varianten Gegenstand der Bauteilanalysen: das 8-Gang-Hybridgetriebe und das Two-Mode-Getriebe. Für detaillierte Ergebnisse der Analysen wird auf den Anhang verwiesen.

- **Verbrennungsmotor**

(Kurbelwelle, Pleuel, Kolben, Motorblock, Zylinderkopf, Nockenwelle)

- Luftversorgung
- Abgasanlage
- Einspritzanlage
- Zündanlage
- Motorsteuergerät
- Starter-Generator

- **Getriebe**

1. 8-Gang-Hybridgetriebe incl. E-Maschine (Zweimassenschwungrad, Planetenradsätze, Wellen, Rotor, Stator, Gehäuse)
2. Two-Mode-Getriebe (Zweimassenschwungrad, Planetenradsätze, Wellen, Getriebegehäuse, Innenrotor, Außenstator, Gehäuse)

- Kardanwelle
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- Kraftstofftank

- **Traktionsbatterie**

(mit Batteriezellen im Pouch-Zell-Design – Abstands-/ Klemmrahmen, Modulrahmen, Zell-Stack, Wandung/ Zellrahmen, Kühlapparat/ Behälter, Druckplatte, Verdampferplatte, Mechanische Verbinder, Modulgehäuse, Gesamtgehäuse/ Trog, Bodenplatte/ Träger, Anschlussplatte, Rahmen)

- **Leistungselektronik**

(Bodenplatte Leistungsmodul, Gehäuse Leistungsmodul, Gesamtgehäuse)

2.5.4 Referenz-Fahrzeug Range-extended Electric Vehicle – REX

Das Referenzfahrzeug Range-extended Electric Vehicle (REX) im Jahr 2010 besitzt einen 111kW starken Elektromotor und zusätzlich einen 4-Zylinder Verbrennungsmotor mit 53kW Leistung, der bei geringem Ladezustand der Batterie anspringt, um die Batterie aufzuladen und so als Reichweitenverlängerer fungiert. Als Äquivalent für das Referenzfahrzeug wurde der Chevrolet Volt gewählt. Das Getriebe ist als einstufiges Automatikgetriebe mit konstanter Übersetzung definiert, das die Kraft über ein Planetengetriebe überträgt. Die Abgasanlage besteht aus einem Katalysator. Das Lithium-Ionen (Li-Ion) Batteriesystem besitzt 16kWh Kapazität. Als REX nutzt das Fahrzeug grundsätzlich eine serielle Antriebsarchitektur.

Die Beschleunigung 0-100km/h beträgt 9,0s, die Höchstgeschwindigkeit 160km/h, der EU-Norm-Verbrauch 4,8l/100km bei Nutzung des Range-Extenders, die Reichweite 500km (65 rein elektrisch), das Gewicht 1.600kg, der CO₂-Ausstoß lokal 100g/km mit laufendem Verbrennungsmotor.

Auch hier liegt der Fokus der technologischen Entwicklung bis zum Jahr 2030 auf dem Batteriesystem, das größer dimensioniert wird (20kWh), um eine höhere Reichweite zu realisieren und Lithium-Ionen-Batteriezellen im Pouch-Design nutzt. Die Kühlung des Batteriesystems wird über Wasser umgesetzt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der als Reichweitenverlängerer genutzte Verbrennungsmotor (ca. 40kW) optimiert wird, um Verbräuche und Emissionen zukünftig weiter zu verringern. So nutzt der Range-Extender im Jahr 2030 Direkteinspritzung, eine Verringerte Zylinderzahl und eine optimierte Aufladung (Downsizing). Das Getriebe ist als 2-stufiges Automatik-Getriebe ausgelegt. Ein optimierter Katalysator sowie Abgasrückführungs- und -nachbehandlungssysteme werden eingesetzt. Die elektrische Maschine hat eine Leistung von ca. 110kW. Die Antriebsarchitektur des Fahrzeugs ist weiterhin seriell.

Das Referenzfahrzeug hat damit im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 9,0s, Höchstgeschwindigkeit 160km/h, EU-Norm-Verbrauch 3,0l/100km bei Nutzung des Range-Extenders, Reichweite 700km (120 rein elektrisch), Gewicht 1.500kg, der CO₂-Ausstoß lokal 50g/km mit laufendem Verbrennungsmotor.

Das mit einem Range-Extender ausgestattete Fahrzeug im Jahr 2030 ist durch die nachfolgenden Systeme gekennzeichnet. Neben dem Verbrennungsmotor, dem Batteriesystem und der Leistungselektronik ist das System „Elektrische Maschine“ Fokus der Betrachtung.

- **Verbrennungsmotor**

(Kurbelwelle, Pleuel, Kolben, Motorblock, Zylinderkopf, Nockenwelle)

- Luftversorgung
- Abgasanlage
- Einspritzanlage
- Zündanlage
- Motorsteuergerät

- Starter-Generator
- Getriebe
- Kardanwelle
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- Kraftstofftank
- **Elektrische Maschine**
 (Rotor, Stator, Gehäuse)
- **Traktionsbatterie**
 (mit Batteriezellen im Pouch-Zell-Design – Abstands-/ Klemmrahmen, Modulrahmen, Zell-Stack, Wandung/ Zellrahmen, Kühlapparat/ Behälter, Druckplatte, Verdampferplatte, Mechanische Verbinder, Modulgehäuse, Gesamtgehäuse/ Trog, Bodenplatte/ Träger, Anschlussplatte, Rahmen)
- **Leistungselektronik**
 (Bodenplatte Leistungsmodul, Gehäuse Leistungsmodul, Gesamtgehäuse)

2.5.5 Referenz-Fahrzeug Battery Electric Vehicle – BEV

Das Referenzfahrzeug Battery Electric Vehicle (BEV) im Jahr 2010 besitzt einen zentral verbauten 100kW starken Elektromotor. Als Äquivalent für das Referenzfahrzeug wurde der Ford Focus BEV gewählt. Das Getriebe ist wie beim Range-extended Electric Vehicle als einstufiges Getriebe definiert, das ein Planetengetriebe zur Kraftübertragung nutzt. Die Abgasanlage entfällt komplett. Das Lithium-Ionen-Batteriesystem besitzt 23kWh Kapazität.

Die Beschleunigung des Referenzfahrzeugs 0-100km/h ist offiziell noch nicht bekannt, dürfte aber bei ca. 9,5s liegen, die Höchstgeschwindigkeit beträgt 140km/h, die Reichweite 120km, das Gewicht 1.700kg.

Neben der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik ist das Batteriesystem der zentrale Hebel für die technologische Weiterentwicklung des BEVs bis zum Jahr 2030. Zur Realisierung einer größeren Reichweite wird es größer dimensioniert (25kWh). Lithium-Ionen-Batteriezellen im Pouch-Zellen-Design werden genutzt und über eine Wasserkühlung im optimalen Temperaturbereich gehalten. Das Getriebe ist als 2-stufiges Automatik-Getriebe ausgelegt. Die Elektromotoren werden in Radnähe verbaut und haben eine Gesamtleistung von ca. 110kW.

Das Referenzfahrzeug hat damit im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 9,0s, Höchstgeschwindigkeit 150km/h, Reichweite 170km, Gewicht 1.500kg.

Das mit einer Batterie betriebene Fahrzeug im Jahr 2030 ist durch folgende Systeme gekennzeichnet:

- Getriebe
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- **Elektrische Maschine**
 (Rotor, Stator, Gehäuse)
- **Traktionsbatterie**
 (mit Batteriezellen im Pouch-Zell-Design – Abstands-/ Klemmrahmen, Modulrahmen, Zell-Stack, Wandung/ Zellrahmen, Kühlapparat/ Behälter, Druckplatte, Verdampferplatte, Mechanische Verbinder, Modulgehäuse, Gesamtgehäuse/ Trog, Bodenplatte/ Träger, Anschlussplatte, Rahmen)
- **Leistungselektronik**
 (Bodenplatte Leistungsmodul, Gehäuse Leistungsmodul, Gesamtgehäuse)

Die Elektrische Maschine, das Batteriesystem im Pouch-Zellen-Design sowie die Leistungselektronik definieren das Batterie-betriebene Fahrzeug im Jahr 2030 und sind Fokus der Darstellungen. Die Detail-Analysen befinden sich ebenfalls im Anhang.

2.5.6 Referenz-Fahrzeug Fuel Cell Vehicle – FCV

Das Referenzfahrzeug Fuel Cell Vehicle (FCV) im Jahr 2010 besitzt einen 100kW starken Elektromotor, ein einstufiges Getriebe, ein 1,4kWh Lithium-Ionen Batteriesystem, ein Brennstoffzellensystem sowie einen Wasserstoffdruckspeicher als zentrale Systeme. Als Äquivalent für das Referenzfahrzeug wurde die Mercedes F-Cell B-Klasse gewählt.

Die Beschleunigung 0-100km/h beträgt 11,4s, die Höchstgeschwindigkeit 170km/h, der EU-Norm-Verbrauch 3,3l/100km, die Reichweite 400km, das Gewicht 1.800kg.

Neben der elektrischen Maschine ist das Brennstoffzellensystem und der Wasserstoffdruckspeicher zentrales Element des Fahrzeugs und Fokus der technologischen Entwicklung bis zum Jahr 2030. Das Batteriesystem wird zudem größer dimensioniert (2kWh) und nutzt wassergekühlte Lithium-Ionen-Zellen im Pouch-Bag-Design. Das Getriebe im Jahr 2030 ist ein automatisiertes Zweistufengetriebe.

Das Referenzfahrzeug hat damit im Jahr 2030 folgende simulierte Eigenschaften: Beschleunigung 0-100km/h in 10,0s, Höchstgeschwindigkeit 180km/h, Reichweite 800km, Gewicht 1.600kg.

Das Brennstoffzellen-Fahrzeug im Jahr 2030 ist durch folgende Systeme gekennzeichnet:

- **Brennstoffzellen-System**
(Brennstoffzellen-Stack: Bipolarplatten, Endplatten, Gehäuse Stackmodul, Verrohrung, Isolatorplatten. Brennstoffversorgung: Endplatten, Gehäuse, Saugrohr, Welle, Rotor, Schaufel, Verrohrung. Luftversorgung: Gehäuse. Wärmemanagement: Lamellen, Rahmen, Ausgleichsbehälter, Verrohrung. Wassermanagement: Motor, Antriebswelle, Lager. Brennstoffzellen-System: Trageplatte, Gehäuse mit Kühlrippen)
- **Wasserstofftank**
(Behälter CFK gewickelt, Leitungen)
- Getriebe
- Hinterachsgetriebe
- Seiten-/ Gelenkwellen
- **Elektrische Maschine**
(Rotor, Stator, Gehäuse)
- **Traktionsbatterie**
(mit Batteriezellen im Pouch-Zell-Design – Abstands-/ Klemmrahmen, Modulrahmen, Zell-Stack, Wandung/ Zellrahmen, Kühlapparat/ Behälter, Druckplatte, Verdampferplatte, Mechanische Verbinder, Modulgehäuse, Gesamtgehäuse/ Trog, Bodenplatte/ Träger, Anschlussplatte, Rahmen)
- **Leistungselektronik**
(Bodenplatte Leistungsmodul, Gehäuse Leistungsmodul, Gesamtgehäuse)

Neben der elektrischen Maschine, dem Batteriesystem im Pouch-Zellen-Design sowie der Leistungselektronik sind das Brennstoffzellen-System und der Wasserstofftank Gegenstand der detaillierten Bauteilanalysen im Anhang.

3 Absatzszenarien

Autoren: Benjamin Frieske (DLR-FK), Bernd Propfe (DLR-FK), Martin Redelbach (DLR-FK), Dr.-Ing. Stephan Schmid (DLR-FK)

Zentrale Forschungsfrage dieses Kapitels ist es zu ermitteln, wie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mittel- und langfristig den Fahrzeugabsatz beeinflussen könnte. Vor dem Hintergrund der Herausforderungen, die sich durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs für ein Aggregatwerk stellen, ist es essentiell, die zukünftige Marktdurchdringung elektrisch angetriebener Fahrzeuge und damit die quantitative Auswirkung auf das Werk abzuschätzen. Hierzu sollen eingebunden in das ELAB Projekt ausgehend von der Ableitung eines Basis- bzw. Referenzszenarios extreme zukünftige Entwicklungen analysiert werden. Diese im Sinne der Elektromobilität sehr positiven Alternativszenarien dienen im weiteren Projektverlauf als Grundlage für die Wirkungsanalyse. Ziel war bei diesen Extremszenarien die Darstellung von „what-if“-Entwicklungen, also die Abschätzung, inwiefern sich drastische Umschichtungen in der globalen Neufahrzeugflotte auf das Aggregatwerk auswirken. Insgesamt wurden vier Szenarien abgeleitet.

Die Szenarien umfassen hierbei alle für eine idealtypische Antriebsstrangproduktion relevanten Fahrzeugkonzepte. Um die Wirkungen auf das Werk zu analysieren ist es notwendig, die Szenarien nicht nur auf elektrifizierte Fahrzeuge zu beschränken, sondern den Blick auch auf verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge zu richten. Namentlich werden in den Szenarien die Antriebsstränge „Verbrennungsmotor“ (Internal Combustion Engine, ICE), „Mild-Hybrid“, „Hybrid“ im Sinne eines Vollhybriden inklusive Netzanschluss (Hybrid Electric Vehicle, HEV), „Range-extended Electric Vehicle“ (REX), „Batterie“ (Battery Electric Vehicle, BEV) sowie „Brennstoffzelle“ (Fuel Cell Electric Vehicle, FCV) betrachtet. Aufgrund der ähnlichen Herstellungsprozesse und -qualifikationen wird im Falle der verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeuge nicht weiter in Benzin-, Diesel- und Gasfahrzeuge untergliedert.

Um die langfristige Wirkung eines hohen Marktanteils elektrifizierter Antriebskonzepte beurteilen zu können, wurde auch der Zeithorizont der Marktszenarien entsprechend lang gewählt. Der für die weitere Analyse relevante Zeitraum erstreckt sich bis 2030, wobei der Ausblick bis 2050 stets zur Einordnung der Ergebnisse mit einbezogen wurde. Aufgrund der Annahme, dass das betrachtete Aggregatwerk keine regionalen Teilmärkte beliefert, sondern weltweit operiert, wurden auch die Szenarien nicht in Einzelmärkte untergliedert, sondern betrachten den globalen Neufahrzeugmarkt.

3.1 Methodik und Vorgehensweise

Die Einschätzung zukünftiger Entwicklungen im Neufahrzeugmarkt und damit die Ableitung der ELAB-Marktszenarien stützt sich im Wesentlichen auf die Analyse veröffentlichter Studien. Hierbei wurden Veröffentlichungen unterschiedlichster Ursprungs mit einbezogen. Dedizierte Studien von Beratungsunternehmen, Banken,

einzelnen Firmen sowie öffentlichen Einrichtungen wurden ebenso betrachtet wie publizierte Projektergebnisse nationaler und internationaler Forschungsprojekte.¹

Die unterschiedlichen Veröffentlichungen unterscheiden sich hierbei signifikant in ihrer Ausprägung. So variieren neben den betrachteten Fahrzeugen – in einigen Fällen wurden nur elektrisch angetriebene Fahrzeuge betrachtet – auch die betrachteten Zeithorizonte sowie analysierten Weltregionen.

Um das gesamte Spektrum der veröffentlichten Szenarien analysieren und letztendlich eigene Szenarien ableiten zu können, wurden alle erhobenen Werte für die Entwicklung des Neufahrzeugmarktes gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die Datenbasis nicht gleichmäßig über die Zeit verteilt ist, sondern vielmehr bis 2050 deutlich abnimmt. Im für das Projekt relevanten Zeitraum bis 2030 existiert jedoch eine zur Ableitung von Szenarien ausreichende Datenbasis. Abbildung 8 zeigt die erhobenen Datenpunkte der veröffentlichten Szenarien.

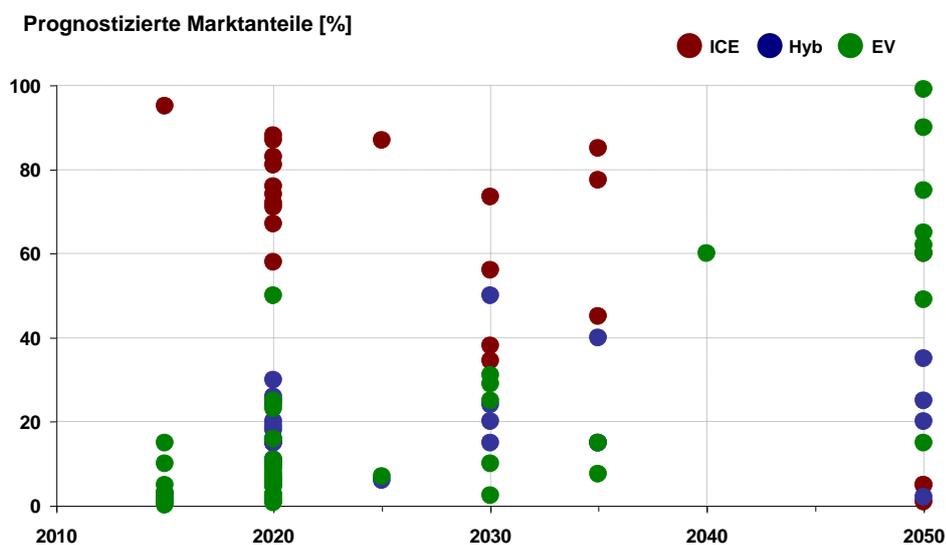


Abbildung 8: Erhobene Datenpunkte der veröffentlichten Szenarien (Grafik: DLR)

Aufgrund der Inhomogenität der Veröffentlichungen war es in diesem ersten Schritt nicht möglich, die eingangs beschriebene Einteilung der Arten von Antriebssträngen beizubehalten. „ICE“ repräsentiert im Schaubild die verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeuge, „Hyb“ alle Hybridvarianten und „EV“ alle hauptsächlich elektrisch angetriebenen Fahrzeuge (Batterie, Brennstoffzelle und Range-Extender). Deutlich zu erkennen sind die variierenden Einschätzungen hinsichtlich der Entwicklung zukünftiger Marktanteile. So reicht die Spanne der ICEs von unter 40% in 2030 (International Energy Agency (IEA), 2010) (Shell, 2009) bis zu 85% in 2035

¹ Die analysierten Studien umfassen u.a. (AT Kearney, 2009), (B&D Forecast, 2006), (Bain & Company, 2010), (Bandivadekar, et al., 2008) (Bodek & Heywood, 2008), (Bohr, 2009) (Deutsche Bank, 2008), (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, 2010), (Frost & Sullivan, 2009), (HyWays, 2006), (Institut für Mobilitätsforschung, 2010), (International Energy Agency (IEA), 2010), (JDPower, 2010), (Oliver Wyman, 2009), (Roland Berger Strategy Consultants, 2010), (Shell, 2009), (The Boston Consulting Group (BCG), 2009), (The Royal Academy of Engineering, 2010). Für eine vollständige Liste wird auf das Literaturverzeichnis verwiesen.

(Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2008). Noch signifikanter stellen sich die Abweichungen der Marktanteile von Elektrofahrzeugen dar. Zwischen der optimistischsten Einschätzung von 50% bereits in 2020 (Bain & Company, 2010) und der konservativsten Berechnung von 15% in 2050 (McKinsey & Company, 2010) liegt ein deutlicher Unterschied. Die Ableitung eines Referenzszenarios auf diesem ersten stark aggregierten Level erwies sich im Projektverlauf als nicht zweckdienlich. Abbildung 9 stellt die beobachtbaren Unterschiede grafisch dar.

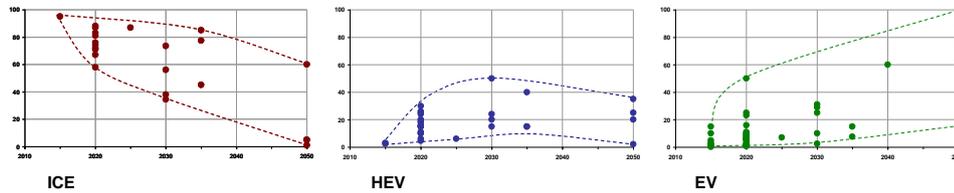


Abbildung 9: Beobachtbare Unterschiede innerhalb der prognostizierten Marktanteile, differenziert nach ICE, HEV und EV (Grafik: DLR)

Um dennoch Erkenntnisse aus der Analyse der Veröffentlichungen gewinnen zu können, wurde eine detaillierte Betrachtung der Datenbasis erforderlich. Hierbei zeigte sich, dass Tendenzen zwischen den Szenarien erkennbar sind. So gehen alle Szenarien davon aus, dass der Anteil an verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen langfristig sinken wird. Darüber hinaus unterstellen die meisten Studien mittelfristig ein überproportionales Wachstum des Marktanteils von Hybridfahrzeugen. In den meisten Fällen wird hier von „Wegbereitertechnologien“ gesprochen. Langfristig, also im Zeithorizont bis 2050, antizipieren nahezu alle Veröffentlichungen eine Dominanz von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Die Mehrheit der Studien erwartet hier Marktanteile von über 50%.

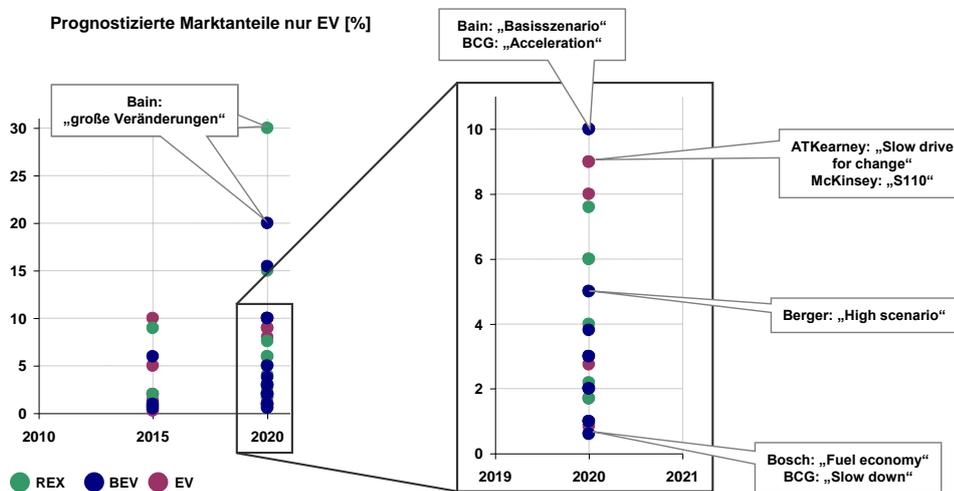


Abbildung 10: Ausschnitt aus der Datenbasis: Differenzierung der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge im Zeithorizont bis 2020 (Grafik: DLR)¹

¹ (REX: Range-extended Electric Vehicle, BEV: Battery Electric Vehicle, EV: elektrisch angetriebenes Fahrzeug, ohne nähere Spezifizierung)

Bemerkenswerterweise unterscheiden sich die Veröffentlichungen allerdings in einigen Punkten untereinander. Die meisten Publikationen betrachten – ähnlich wie das ELAB-Projekt auch – ausgehend von einem Referenzszenario Alternativszenarien. Hierbei handelt es sich in der Regel um ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario im Sinne der Elektromobilität. Vergleicht man die Datenpunkte der jeweiligen Szenarien miteinander, so fällt auf, dass die Marktdurchdringungen von Elektrofahrzeugen in einigen Fällen im optimistischen Szenario von Veröffentlichung A unter dem Wert des pessimistischen Szenarios von Veröffentlichung B liegen. Diese Abweichung lässt sich in mehreren Fällen beobachten. Besonders deutlich werden diese Abweichungen, falls man an Stelle aller Antriebsstränge die Marktanteile elektrisch angetriebener Fahrzeuge weiter differenziert und gleichzeitig den Zeithorizont bis 2020 näher betrachtet. Abbildung 10 zeigt den betreffenden Ausschnitt der erhobenen Datenpunkte. Die Bezeichnungen der Fahrzeuge sind hierbei identisch mit den oben eingeführten Begrifflichkeiten.

3.2 Ableitung von Szenarien

Wie bereits eingangs erwähnt, war das Ziel der Arbeiten die Ableitung eines Basis- bzw. Referenzszenarios sowie darauf aufbauend das Aufzeigen extremer zukünftiger Entwicklungen mit Hilfe von „what-if“-Szenarien. Das Basisszenario stützt sich hierbei auf die Zusammenfassung der veröffentlichten Studien. Sowohl quantitative als auch qualitative Einschätzungen wurden hierbei berücksichtigt. Die getroffenen Annahmen wurden in unterschiedlichen Expertenrunden diskutiert und plausibilisiert.

3.2.1 ELAB-Referenzszenario

Abbildung 11 stellt die Marktanteile des weltweiten Neufahrzeugmarktes im ELAB-Referenzszenario grafisch dar. Schraffierte Flächen indizieren einen verbrennungsmotorischen Anteil am jeweiligen Antriebsstrang. Im für das Projekt relevanten Zeitraum bis 2030 wurde ein moderater Anstieg der Marktanteile alternativer Antriebsstränge antizipiert. Mit 40% Marktanteil von ausschließlich von Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen wurde im Vergleich zu 15% an rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (BEV und FCV) ein realistisches Verhältnis gewählt. Hierbei wurden bis 2030 neben Batteriefahrzeugen auch Brennstoffzellenfahrzeuge berücksichtigt – wenn auch mit einem nur geringen Anteil von 5%.

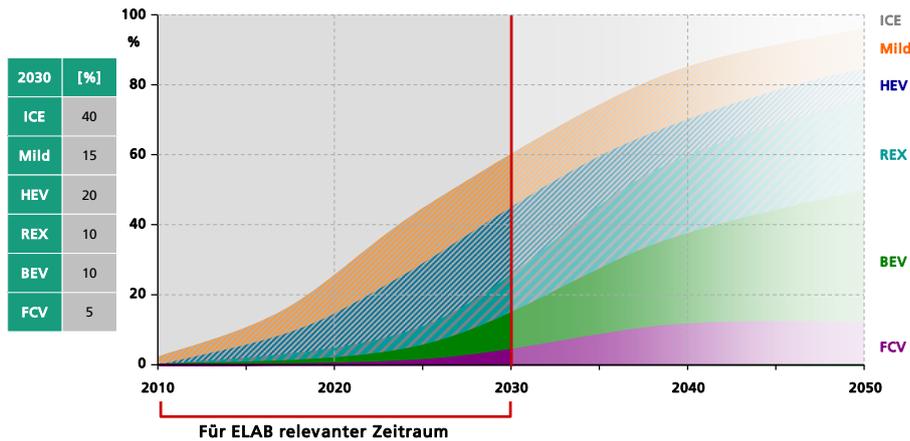


Abbildung 11: Marktanteile des weltweiten Neufahrzeugmarktes im ELAB-Referenzszenario (Grafik: DLR)¹

Zu erkennen ist das bis 2025 überproportionale Wachstum der hybriden Antriebsstränge (Mild, HEV und REX). Hiermit wird der allgemeinen Einschätzung der analysierten Studien Rechnung getragen, dass diese Antriebsstränge als Wegbereiter für vollelektrische Antriebe dienen können. Mild- und Vollhybride stellen so in 2030 35% des Neufahrzeugmarktes dar. Im langfristigen Ausblick bis 2050 wurde antizipiert, dass Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge einen Marktanteil von etwa 50% erreichen. Dem gegenüber werden allerdings auch bis zu diesem Zeitpunkt verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge nicht vollständig aus dem Markt verdrängt worden sein und noch einen geringen Anteil für sich behaupten können. Der verbleibende Marktanteil wird von hybriden Antriebssträngen eingenommen, wobei hier von einer Steigerung des Anteils von Range-Extender-Fahrzeugen auf Kosten des Anteils an Voll- und Plug-In-Hybriden ausgegangen wird. Insgesamt stellt dieses Referenzszenario also ein ausgewogenes Mittel aus den analysierten Studien dar und antizipiert eine praktikable zukünftige Entwicklung. Die angenommene Entwicklung der Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes erfüllt die nationalen politischen Ziele und wird im Sinne eines „best-guess“-Szenarios als erreichbar eingeschätzt.

3.2.2 Alternativszenarien

Um im weiteren Projektverlauf die Auswirkungen auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion und deren Standortumgebung ableiten zu können, wurden ausgehend von diesem Referenzszenario alternative zukünftige Entwicklungen abgeleitet. Hierbei wurden neben einem weiterhin verbrennungsmotorisch dominierten Szenario zwei – für die Elektromobilität – sehr positive Marktentwicklungen skizziert. Diese beiden Extremszenarien antizipieren zum einen eine stark von Batteriefahrzeugen geprägte Marktentwicklung, und zum anderen einen signifikanten Markterfolg von Brennstoffzellenfahrzeugen. Abbildung 12 stellt die vier Szenarien grafisch gegenüber.

¹ Fahrzeuge: ICE: Verbrennungsmotor, Mild: Mild-Hybrid, HEV: Vollhybrid, inklusive Netzanschluss, REX: Range-extended Electric Vehicle, BEV: Battery Electric Vehicle, FCV: Fuel Cell Vehicle; schraffierte Flächen: verbrennungsmotorischer Anteil

Das verbrennungsmotorisch dominierte Szenario (ICE-Szenario) unterstellt, dass sich auch langfristig keine rein elektrischen Antriebe am Massenmarkt behaupten können und lediglich in Nischensegmenten Anwendung finden werden. Neben Mildhybriden mit einem Marktanteil von 20% erlangen Vollhybride bis 2030 einen Anteil von 10%. Somit werden über zwei Drittel des Marktes auch in 20 Jahren noch von rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen bedient. Im langfristigen Ausblick bis 2050 reduziert sich dieser Anteil zwar auf etwa die Hälfte, rein elektrische Fahrzeugkonzepte können sich allerdings auch hier nicht durchsetzen. Dieses Szenario dient für die weiteren Arbeiten zur Folgenabschätzung im Sinne eines konservativen Randszenarios im Hinblick auf die Elektrifizierung der Neufahrzeugflotte. Die aufgezeigte Entwicklung liegt aus heutiger Sicht aufgrund der zu erwartenden Steigerung von Energiekosten sowie verschärften politischen Randbedingungen außerhalb des realistisch denkbaren Bereichs und ist somit als Extremszenario anzusehen.

Im von Batteriefahrzeugen geprägten Alternativszenario (BEV-Szenario) wird eine konträre Entwicklung antizipiert. Bis 2030 werden konventionelle Verbrennungsmotoren vollständig aus dem Markt verdrängt. Mit einem Neufahrzeugmarktanteil der Batteriefahrzeuge von 40% in 2030 wird eine sehr optimistische Zukunft aufgezeigt. Neben den batterie-elektrischen Fahrzeugen wird Brennstoffzellenfahrzeugen ein Marktanteil in 2030 von 10% zugesprochen. Wie bereits im Referenzszenario wird auch in diesem Szenario unterstellt, dass Hybridtechnologien als eine Art Wegbereiter für rein elektrische Antriebe dienen. So wächst insbesondere der Anteil von Mild- und Vollhybriden um das Jahr 2020 überproportional. Hierzu setzt das Wachstum des Marktanteils von Range-Extender-Fahrzeugen zeitverzögert ein, bis sich langfristig (bis 2050) Batteriefahrzeuge über zwei Drittel des Marktes sichern können. In diesem Szenario erlangen Brennstoffzellenfahrzeuge Marktanteile, spielen für den Gesamtmarkt mit 5% in 2030 allerdings eine untergeordnete Rolle. Die antizipierte Entwicklung der Zusammensetzung des Neufahrzeugmarktes stellt eine aus heutiger Sicht progressive, allerdings denkbare Evolution dar. Unter drastisch verschärften politischen Randbedingungen wie beispielsweise der CO₂-Gesetzgebung sowie einem signifikant steigenden Rohölpreis ist dieses Szenario als erreichbar einzustufen.

Das zweite optimistische Alternativszenario (FCV-Szenario) betrachtet eine Marktzusammensetzung, in welcher Brennstoffzellenfahrzeuge signifikante Marktanteile gewinnen können. Insgesamt werden verbrennungsmotorisch angetriebene Fahrzeuge in diesem Szenario bis 2030 auf einen Marktanteil von 10% zurück gedrängt. Wie bereits im BEV-Szenario dienen auch im FCV-Szenario Hybridtechnologien als Wegbereiter für vollelektrische Antriebe. Bis 2030 werden so – analog zum BEV-Szenario – 50% des Neufahrzeugmarktes von rein elektrischen Antriebskonzepten (BEV und FCV) eingenommen, wenngleich in diesem Szenario die Batteriefahrzeuge eine untergeordnete Rolle spielen. Aufgrund der kannibalisierenden Wirkung von Brennstoffzellenfahrzeugen auf Range-Extender-Fahrzeuge, können diese bis 2030 nur etwa 10% und damit einen deutlich geringeren Marktanteil als im BEV-Szenario gewinnen. Langfristig wird auch hier davon ausgegangen, dass sich vollelektrische Antriebe durchsetzen werden und bis 2050 etwa vier Fünftel des Marktes für sich behaupten können. Die Dominanz der Brennstoffzellenfahrzeuge bildet einen Extremfall ab, der nur unter sehr speziellen Randbedingungen, insbesondere im Hinblick auf die Systemkosten von Brennstoffzellen und die Verfügbarkeit von H₂-Betankungsinfrastruktur, denkbar ist. Im Rahmen der weiteren Analysen stellt dieses Szenario also ebenfalls einen Extremfall dar, welcher zur Folgenabschätzung dient.

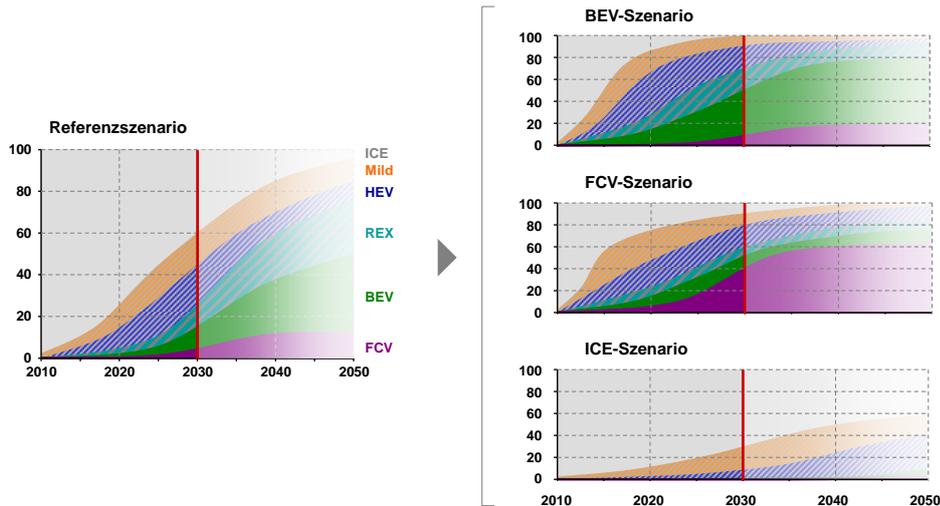


Abbildung 12: Ableitung von drei Alternativszenarien ausgehend vom Referenzszenario (Grafik: DLR)

Abschließend lässt sich feststellen, dass die analysierten Studien sehr breite Spannen hinsichtlich der zukünftigen Marktzusammensetzung aufzeigen. Alle Veröffentlichungen betrachten die Marktchancen elektrischer Fahrzeugantriebe, sind sich teilweise jedoch in der Einschätzung möglicher Entwicklungen uneins. Die Ableitung des ELAB-Referenzszenarios erforderte demzufolge eine detaillierte Betrachtung der Datenbasis. Im für das Projekt relevanten Betrachtungszeitraum bis 2030 wurde im Basisszenario eine Marktzusammensetzung gewählt, wie sie aus heutiger Sicht für alle beteiligten Experten sowie auf Basis der Veröffentlichungen realistisch erscheint.

Ausgehend von diesem Referenzszenario wurden drei Alternativszenarien skizziert, welche extreme zukünftige Entwicklungen aufzeigen sollen. Hierzu wurden neben einem sehr konservativen Szenario, welches eine Dominanz von rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen antizipiert zwei deutlich positive Szenarien im Sinne der Elektromobilität abgeleitet. Hierbei wurden zukünftige Entwicklungen sowohl hin zu einer von Batteriefahrzeugen als auch hin zu einer von Brennstoffzellenfahrzeugen dominierten Zukunft berücksichtigt. Im weiteren Projektverlauf dienen diese drei „what-if“-Szenarien zur Analyse der Wirkungen auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion.

4 Produktionsprozesse von Komponenten konventioneller und neuer Antriebsstränge

Autoren: Simon Voigt (Fraunhofer IAO), Florian Herrmann (Fraunhofer IAO), Peter Rally (Fraunhofer IAO), Carolina Sachs (Fraunhofer IAO)

Im Folgenden werden die für das Forschungsvorhaben relevanten Schlüssel-Komponenten in ihren Ausführungsformen und charakteristischen Merkmalen beschrieben und hinsichtlich derzeitiger und potentieller Produktionstechnologien detaillierter analysiert. Hierbei soll der Forschungsfrage nachgegangen werden, auf welche Bereiche die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in der Aggregateproduktion wirkt und welche Fertigungsprozesse zu beherrschen sind. Die Untersuchung berücksichtigt sowohl Fertigungs- als auch Montageprozesse unter Berücksichtigung benötigter und zur Herstellung geeigneter Werkstoffe. Hierbei werden Prozessschritte und Technologien untersucht, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion realisiert werden können. Die analysierten Komponenten sind der Verbrennungsmotor, das (Hybrid-)Getriebe, die elektrische Maschine, die Leistungselektronik, das Brennstoffzellensystem sowie das Batteriesystem. Vorgelagerte Prozesse, wie beispielsweise Misch- und Aufarbeitungsvorgänge, welche in der Batterie-Zellfertigung erforderlich sind und bereits in vorangegangenen Arbeitspaketen vom Untersuchungsgegenstand ausgeschlossen wurden, werden nicht weiter betrachtet.

4.1 Einführung und allgemeine Implikationen

4.1.1 Begriffliche Abgrenzung und Definitionen

Der Terminus Produktionstechnik hat sich als übergeordneter Begriff für die Bereiche *Produktionstechnologie*, *Produktionsmittel* und *Produktionslogistik* entwickelt. Als Aufgabe der Produktionstechnik kann hierbei die Anwendung geeigneter Produktionsverfahren und Produktionsmittel zur Durchführung von Produktionsprozessen bei möglichst hoher Produktivität verstanden werden. Werden unter Produktionsmitteln beispielsweise sämtliche Anlagen und Maschinen sowie Vorrichtungen, Werkzeuge und sonstigen Produktionsgerätschaften zusammengefasst, so beschreibt die Produktionslogistik die Funktionen des Gütertransports und der Lagerung im Kontext eines Produktionsbetriebs (Spur, 2007). „Die Produktionstechnologie wiederum „[...] ist als *Verfahrenskunde der Gütererzeugung die Lehre von der Umwandlung und Kombination von Produktionsfaktoren in Produktionsprozessen unter Nutzung materieller, energetischer und informationstechnischer Wirkflüsse*“ (Spur, 2007). Im Kontext des Forschungsvorhabens ELAB liegt der Fokus auf der Fragestellung, welche Produktionstechnologien zur Herstellung von Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs eingesetzt werden können. Die Untersuchung betrachtet hierbei Fertigungs- und Montageprozesse diskreter Güter. Aufarbeitungsprozesse, Misch- oder Abfüllvorgänge, wie beispielsweise in der Batteriezellherstellung, zählen nicht zum Gegenstand der Betrachtung. Gemäß der DIN 8580 lassen sich die Fertigungsverfahren hierbei in sechs Hauptgruppen unterteilen, welche im Folgenden näher betrachtet werden (Grode, 2001).

Hauptgruppe	Technik (Auswahl)	Beispiele (Auswahl)
Urformen (Zusammenhalt schaffen)	<i>Gießen, Sintern, Spritzgießen Extrudieren Urformen von faserverstärkten Kunststoffen</i>	<i>Kokillenguss, Druckguss, Axialpressen, Wickeln von Kohle- oder Glasfaserstrukturen</i>
Umformen (Zusammenhalt beibehalten)	<i>Massivumformen Drahtwickeln</i>	<i>Schmieden, Tiefziehen, Walzen, Wickeln von Spulen</i>
Trennen (Zusammenhalt aufheben)	<i>Spanloses Trennen, Zerspanung</i>	<i>Sägen, Fräsen, Stanzen, Sandstrahlen</i>
Fügen (Zusammenhalt vermehren)	<i>Schweißen, Kleben, Nieten, Löten, Bonden Pressen/Heißpressen Montage</i>	<i>Lichtbogen-, Laser-, Buckel-, Widerstandsschweißen, Schwallbadlöten, Crimpen, Schneidklemmen, Steckverbindungen, Schrauben, Tripod, Parallelkinematiken, ambidextere Wicklungsmontage</i>
Beschichten	<i>Lackieren, chemische, thermische Verfahren</i>	<i>Tauch-, Sprühlackieren, Plasmabeschichten Nitrieren</i>
Stoffeigenschaften ändern	<i>Thermische Verfahren</i>	<i>Einsatz-, Formhärten, Trocknen</i>

Tabelle 5: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren

Neben neuen Anwendungsmöglichkeiten traditioneller Verfahren, wie dem Gießen, rücken vermehrt auch neue Techniken in den Mittelpunkt der Betrachtung. Zu erwähnen ist das Laserschweißen, unterschiedliche Ansätze bei der Wickeltechnologie oder das Plasmabeschichten. Der Einsatz dieser Technologien in der Antriebsstrangproduktion wird derzeit diskutiert. Weiterhin erfordern die sehr komplexen Montage- und Wickelprozesse innovative Lösungen im Bereich der Handhabungstechnik, sodass verstärkt an dem Einsatz von Industrierobotern und innovativen Tripod- und Parallelkinematiken gearbeitet wird.

4.1.2 Veränderte Anforderungen im Automobilbau

Bedingt durch die Vielfalt in den Antriebskonzepten werden im Kontext einer Antriebsstrangproduktion unterschiedliche Anforderungen an eine Ausgestaltung der Komponenten- und Systemherstellung gestellt. Entwicklungspfade von Hybridfahrzeugen erfordern beispielsweise im Vergleich zu konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotoren zusätzliche Komponenten wie die Leistungselektronik, das Batteriesystem oder die elektrischen Maschinen. Diese lassen sich nur durch den Einsatz zusätzlicher, derzeit nicht innerhalb des Produktionsprozesses eingesetzter Fertigungsverfahren herstellen.

In einer Studie des Vereins Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW) in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung

wurde untersucht, welchen Einfluss zukünftige Antriebskonzepte auf die Produktionstechnik nehmen können. Dabei konnte erarbeitet werden, dass heutige Verfahren zur mechanischen Bearbeitung von Komponenten der konventionellen Verbrennungskraftmaschine zukünftig mehr oder weniger an Bedeutung verlieren könnten. Die Annahme einer flächendeckenden Elektromobilität dürfte, laut Experten, zu einer Reduzierung von bis zu 70% bei den Zerspanzeiten führen. Betroffen wären hierbei sowohl Fertigungsverfahren der Motorenproduktion sowie die der Getriebeherstellung (Würz & Bell, 2009). Aussagen über Extremszenarien dürften mittelfristig allerdings noch von untergeordneter Relevanz sein. Beispielsweise werden Hybridkonzepten weit größere Marktanteile als reinen Elektrofahrzeugen für die kommenden Jahre zugesprochen. Bei diesem Fahrzeugkonzept dürfte sich der Zerspanungsanteil am Fahrzeug sogar um rund 10% im Vergleich zu einem konventionellen verbrennungsmotorisch angetriebenen Antriebsstrang erhöhen (Abele, Hohenstein, Pfeiffer, & von Wühl, 2009). Stärker an Bedeutung gewinnen könnte zudem eine Reihe von umformenden Verfahren wie das Pressen, Ziehen oder Biegen.

Neben neu benötigten Fertigungsverfahren werden sich zukünftig aber auch im Bereich der Materialauswahl Veränderungen ergeben. So könnte laut Schätzungen der Anteil an Kunststoffen im Automobilbau bereits im Jahr 2015 auf 20% ansteigen (Würz & Bell, 2009). Potentielle Anwendungsbereiche moderner polymerer Werkstoffe lassen sich hierbei nicht nur im klassischen Leichtbau finden sondern sie könnten zukünftig auch dazu beitragen, bestehende Herausforderungen im Bereich der Traktionsbatterie oder beim Wärmemanagement zu bewältigen (Hoven-Nievelstein & Dallner, 2011). Des Weiteren stellen der Umgang mit biegeschlaffen Teilen oder Prozesse im Kontext von Hochvoltbereichen neue Anforderungen an die Ausgestaltung eines Produktionsbetriebs (Handhabungstechniken, Qualitätssicherung, Schulung der Mitarbeiter, etc.). Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, lassen sich die Entwicklungen im Bereich der Produktionstechnik für Komponenten und Systeme zukünftiger Fahrzeugkonzepte nicht separiert betrachten. Im übergeordneten Spannungsfeld von Kosten, Qualität und Zeit stehen die Bereiche „Fahrzeugkonzepte“, „Fertigungsverfahren“ und „Werkstoffe/Materialien“ in direkten Wechselwirkungen zueinander. Die Marktentwicklungen im Bereich alternativer Antriebskonzepte bedingen beispielsweise die Bedeutung bestehender oder zukünftiger Fertigungsverfahren und deren Prozessentwicklungen. In direktem Zusammenhang müssen hierbei die Materialauswahl aber indirekt auch Faktoren wie die Materialverfügbarkeit gesehen werden. Nur durch Verbesserungen in den Prozessen wiederum lassen sich Herstellkosten senken und können somit zu einer Marktdurchdringung neuer Fahrzeugkonzepte beitragen.

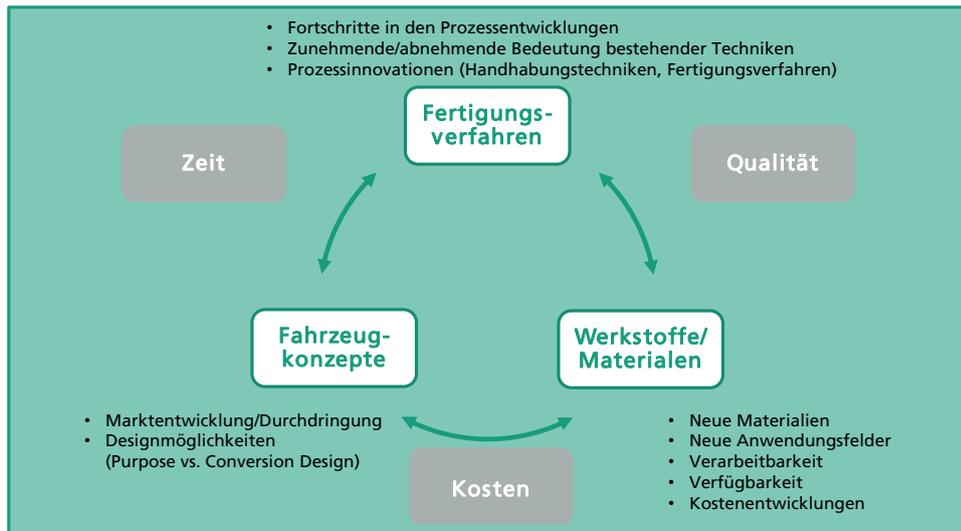


Abbildung 13: Wirkzusammenhänge bei der Herstellung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)

Weiterhin müssen Aspekte wie Skalierbarkeit, Variantenflexibilität und Serientauglichkeit berücksichtigt werden. Die Verbreitung elektromobiler Fahrzeugkonzepte steht zwar derzeit noch am Anfang und ermöglicht nur eine sehr geringe Stückzahl, allerdings erfolgt nach einem (erwarteten) langsamen Anlauf die Notwendigkeit einer hohen Skalierbarkeit der Produktion, um die (späteren) hohen Stückzahlen im Automobilbau abbilden zu können. Gerade die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert umfassende Forschungsanstrengungen (NPE, 2010). Ferner ist davon auszugehen, dass zukünftige Produktionsstrukturen mit einer größeren Anzahl an Produktvarianten umgehen müssen. Dies bedingt wiederum neue Anlagenkonzepte und integrierte Prozessketten welche besonders auf diese Variantenflexibilität ausgerichtet sind.

4.2 Verbrennungsmotor

4.2.1 Produkttypologie

Aktuelle Verbrennungsmotoren sind sehr energieeffizient geworden und werden auch weiterhin ihre spezifischen Märkte haben. Weitere Effizienzsteigerungen von 20%-30% (siehe Kapitel 2) werden den Verbrennungsmotor noch länger als Transportalternative bestehen lassen.

Für die Betrachtungen in dieser Studie werden nicht alle Komponenten eines Verbrennungsmotors berücksichtigt, sondern lediglich diejenigen, bei denen die Automobilhersteller ihre Kernkompetenzen sehen und die von den meisten Herstellern noch selbst hergestellt werden.

4.2.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

Bei der Betrachtung der Verbrennungsmotoren wird der Fokus auf fünf Hauptkomponenten, die sogenannten „Five C`s“, gelegt. Diese fünf Elemente sind:

- Pleuelstange (Connecting-rod),
- Kurbelwelle (Crankshaft)
- Nockenwelle (Camshaft)
- Kurbelgehäuse (Cylinderblock) und
- Zylinderkopf (Cylinder-head)

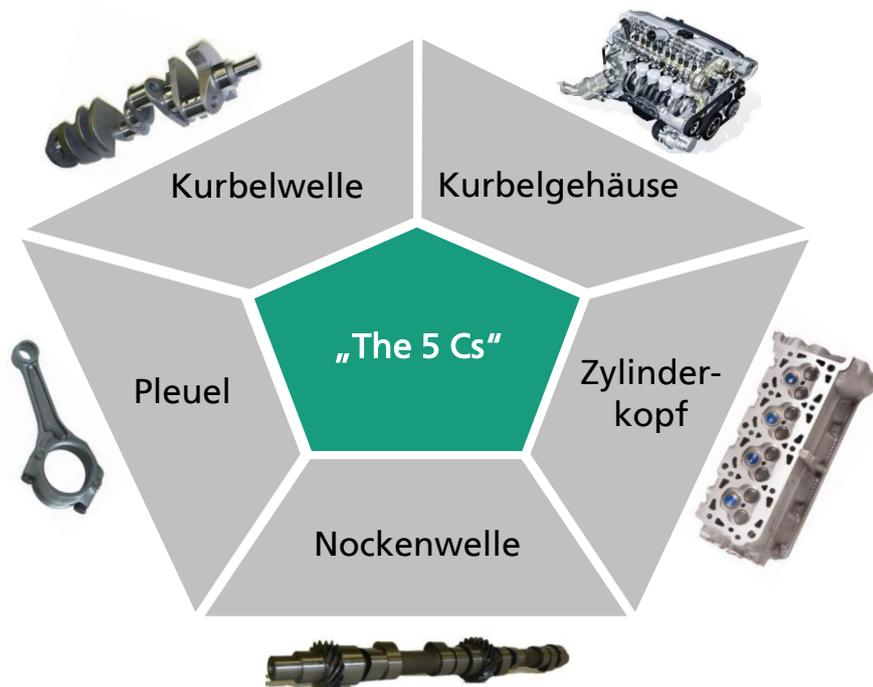


Abbildung 14: Die fünf Hauptkomponenten des Verbrennungsmotors (Grafik: Fraunhofer IAO)

Wesentliche Herstellprozesse

Die wesentlichen Fertigungsverfahren und Beispiele hierfür sind in Tabelle 5 dargestellt. Zur Herstellung der Motorenhauptkomponenten sind die typischen Verfahren

zur Herstellung der Rohlinge **Gießen** und **Schmieden**, teilweise kommt auch **Sintern** zum Einsatz.

Die Prozesskette der mechanischen Fertigung der Hauptbauteile ist im Wesentlichen durch die Oberbegriffe Grobbearbeitung und Feinbearbeitung sowie Reinigung und Prüfen beschrieben. Jedes Bauteil weist jedoch noch seine speziellen Prozessanforderungen auf, wie beispielsweise das Honen der Zylinderlaufbahnen beim Kurbelgehäuse, oder das Bruchtrennen der Pleuelstange.

Die **mechanische Bearbeitung** der Motorkomponenten aus Aluminium-, Stahl- und Grauguss erfolgt auf konventionellen oder verketteten Transferstraßen. In der Großserienfertigung geschieht dies auf vollautomatischen CNC-Bearbeitungslinien, für kleine Serien auch auf CNC-Einzelmaschinen und Bearbeitungszentren.

Zu dem Schritt **Grobbearbeitung** zählt beispielsweise das Fräsen der Enden auf die richtige Länge, das Zentrieren und die Bearbeitung an den Lagerflächen.

Bei der **Wärmebehandlung** unterscheidet man thermische Verfahren wie Härten und Vergüten und thermochemische Verfahren wie Aufkohlen und Nitrieren. Ihr Zweck ist die Härte und die Festigkeit der Bauteile zu erhöhen.

Die **Feinbearbeitung** sorgt mit den Prozessschritten wie Schleifen oder Honen dafür, dass Toleranzen eingehalten und die notwendigen Oberflächeneigenschaften erreicht werden.

Nach der mechanischen Fertigung von Motorenkomponenten schließt sich die mehrstufige Montage zum Komplettmotor an, die von **Wasch- und Prüftätigkeiten** begleitet wird und so eine hohe Qualität sicherstellt.

4.2.2.1 Montage der Verbrennungsmotoren

Die Hauptkomponenten (Five C) werden mit weiteren Komponenten / Modulen, wie Saugrohr, Abgasmodul, Ölwanne, etc. in der Montage zum Motor zusammengefügt. Ohne Vor- und Fremdmontagen ergibt sich folgende Abbildung für eine Motorenmontage

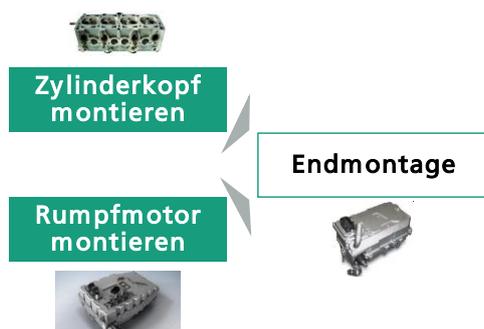


Abbildung 15: Endmontage des Verbrennungsmotors aus den Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)

In den Bereichen der Zylinderkopf- und Rumpfmotormontagen lassen sich durch Standardisierungen von Aufnahmen und Abmessungen noch hohe Automatisierungsgrade realisieren. Im Bereich der Endmontage ist eine hohe Automatisierung nur schwer möglich. Zum einen wegen der sehr hohen Varianz, die durch die starke Individualisierung in der Ausstattung der Fahrzeuge entsteht, zum anderen durch die

Varianz, die durch länderspezifische Regelungen entstehen und in der Montage soweit wie möglich in die letzten Montageschritte verlagert werden.

Zudem werden in der Endmontage komplexe Komponenten verbaut und schwer zu automatisierende Montagen, wie die Verlegung des Kabelbaums vorgenommen, so dass hier weiterhin viel manuelle Arbeit erbracht wird und dieser Teil der Herstellung von Verbrennungsmotoren beschäftigungsintensiv ist.

Aus diesem Grund wird versucht die hohe Varianz in diesem Bereich näher an die Endmontage der Fahrzeuge heranzubringen. Dies kann durch Verlagerung von Teilmängeln der Motorenendmontage direkt an oder neben das Band der Fahrzeugendmontage erfolgen oder das Customizing der Motoren erfolgt in Industrieparks direkt vor den Fahrzeugmontagen (z.B. Ford Saarlouis), was dem Trend zur Verlagerung von Wertschöpfung vom OEM zum Zulieferer folgt (Automobilindustrie 2010).

4.2.2.2 Herstellung der Hauptkomponenten

In einer Grobbetrachtung kann die Herstellung der Hauptkomponenten auf die Schritte grobbearbeiten, veredeln, feinbearbeiten und reinigen, prüfen und evtl. noch montieren reduziert werden. Im Einzelfall kommen noch spezifische Prozesse hinzu wie das Bruchtrennen bei der Pleuelherstellung oder die Montage (fertigstellen) bei der Kurbelwelle. Zusammengefasst kann die Herstellung der Hauptkomponenten wie folgt dargestellt werden.

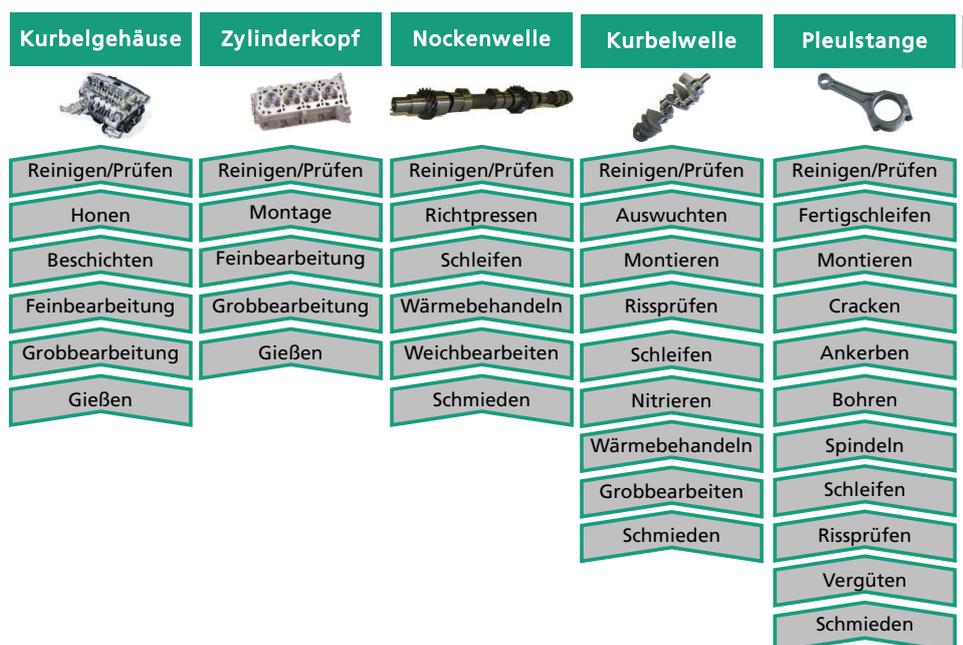


Abbildung 16: Herstellung der Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)

Kurbelwelle

Kurbelwellen werden geschmiedet oder gegossen und werden nach einem hochgenauen Schleifprozess einbaufertig vormontiert.

Wesentliche Entwicklungstendenzen sind bei der Kurbelwelle das Konzept einer gebauten Kurbelwelle, wobei vor allem erhebliche Einsparungen in der Endbearbeitung, sowie die Umsetzung eines Baukastenkonzeptes für Kurbelwellen zu erwarten

sind. Weitere positive Effekte wären: Besseres Reibungsverhalten durch Wälzlagerung, weniger bewegte Massen und insgesamt niedrigere Herstellkosten.

Kurbelgehäuse

Das Urformen des Kurbelgehäuses erfolgt durch einen Gussprozess. Neuerungen bei den Kurbelgehäusen stellen sich im Bereich der Grund-Werkstoffe dar, wobei der gewählte Grund-Werkstoff wesentlichen Einfluss auf das weitere Fertigungsverfahren für die Zylinderlaufbahnen hat. Bei Aluminium-Kurbelgehäusen werden verschiedenen Verfahren zur Beschichtung der Zylinderlaufbahnen entwickelt, wie z.B. eine plasmagespritzte Laufsicht.

Weitere Entwicklungen betreffen den Herstellprozess, der durch bessere Genauigkeiten und erhöhte Sauberkeitsanforderungen zu einer besseren Passung mit anderen Komponenten und günstigerer Lagerung der Kurbelwelle führt, was auch zu Geräuschminderungen beim Verbrennungsmotor beiträgt.

Für die Großserienfertigung ergeben sich erhebliche Einsparungen durch Vereinheitlichungen am Kurbelgehäuse. Durch einheitlichere Aufnahme- und Fixierpunkte kann eine bessere Fertigungsqualität erreicht werden, die Fertigungsanlagen können schneller zwischen unterschiedlichen Gehäusen gerüstet werden und bei Übernahme der wesentlichen Elemente in neue Kurbelgehäuse können umfangreiche Neuinvestitionen vermieden werden.

Zylinderkopf

Das Urformen des Zylinderkopfes (Gehäuse) erfolgt durch einen Gussprozess. Beim Zylinderkopf werden ebenfalls unterschiedliche Werkstoffe untersucht. Einsparpotenziale liegen in geänderten Nockenwellenlagerungen, indem z.B. die Lagerböcke direkt den Nockenwellen zugeordnet werden, was einige Bearbeitungsschritte, wie die Lagergassenbearbeitung beim Zylinderkopf einspart. Durch optimale Werkstoffkombinationen kann der Ölverbrauch reduziert und durch die Verwendung von Wälzlagern die Ventiltriebreibung um ca. 10% reduziert werden.

Weiterhin tragen Optimierungen im Zylinderkopf zur Geräuschreduzierung im Fahrzeug bei.

Nockenwelle

Die Nockenwelle wird typischerweise gegossen oder geschmiedet. Der Trend geht hin zu gebauten Nockenwellen, die aus Einzelementen bestehen, die auf ein Rohr gebaut werden. Neben einer erheblichen Gewichtseinsparung von bis zu 40% können die Einzelemente aus unterschiedlichen Werkstoffen aufgebaut werden. Zudem lassen sich weitere Bauteile an der Nockenwelle montieren, wie Wälzlagerungen oder geschlossene Lagerböcke.

Pleuel

Pleuel werden typischerweise geschmiedet bzw. sintergeschmiedet. Auch bei den Pleueln finden wesentliche Entwicklungen im Werkstoffbereich statt. Die neuen Werkstoffe bringen in Verbindung mit neuen Geometrien entsprechende Gewichtseinsparungen. Zudem sind weitere Einsparungen im Fertigungsbereich möglich, wie z.B. der Wegfall des Hohnens im großen Pleuelauge.

Der Pleuel ist als Verbindungselement im Kurbelbetrieb hohen Belastungen ausgesetzt, insbesondere das kleine Pleuelauge. Waren bisher zylindrische Bohrungen ausreichend, so kann man heute zur Vermeidung von Verschleiß eine Formbohrung vorsehen, die fertigungstechnisch äußerst komplex ist.

4.2.2.3 Trends in der Herstellung der Hauptkomponenten

Die Trends in der Entwicklung bei der Bearbeitung der Hauptkomponenten greifen auf verschiedene Verbesserungspotentiale: Hier einige Beispiele:

Beim **Werkstoffmanagement** spielt neben chemischen und physikalischen Eigenschaften, sowie Kosten und Gewicht, auch vorhandene Produktionsanlagen, die angestrebte Qualität, und nicht zuletzt die Recyclingfähigkeit eine wichtige Rolle. Beispiele sind hierfür die Gewichtsreduzierung des Kurbelgehäuses oder die neuen Möglichkeiten durch gebaute Nockenwellen.

Nebenprozesse wie Reinigen, Entgraten oder Messen wurde in der Vergangenheit nur geringe Beachtung geschenkt. Neue Anforderungen entstehen zum Beispiel aus der Forderung nach **rückstandsfreien Fertigungen**. Die Sauberkeitsanforderungen (Restschmutzmenge) an die Komponenten sind in den letzten 15 Jahren drastisch gestiegen, so sollen Kurbelgehäuse statt 20mg Restschmutzmenge weniger als ca. 5mg haben. Diese Anforderungen führen auch zu neuen Reinigungsverfahren wie z.B. das Stoßwellenverfahren.

Im Bereich der Graugussbearbeitung von Kurbelgehäusen ist die **Trockenbearbeitung** schon lange im Einsatz. Ziel ist es jedoch, die Vorteile der Trockenbearbeitung auch auf die Aluminiumbearbeitung zu übertragen, sodass in Zukunft der Einsatz bei der Zylinderkopfherstellung möglich wird. Auf dem Gebiet der Nockenwellenfertigung ergibt sich eine deutliche Vereinfachung des Fertigungsprozesses durch ein neues Verfahren. Die Nocken werden dabei in Endkontur gesintert, erwärmt und per Roboter montiert. Sie müssen nach der Montage nicht mehr feinbearbeitet werden.

4.3 Getriebe

4.3.1 Produkttypologie

Fahrzeuggetriebe haben in den letzten Jahren eine Zunahme der Gangstufen zu verzeichnen. Aktuell werden Sieben-, Acht- oder Neun-Gang-Getriebe gebaut bzw. entwickelt, die von der Grundkonstruktion sowohl für Verbrennungsmotoren, als auch in Hybridantrieben eingesetzt werden können. Behandelt wird im Folgenden das Automatikgetriebe, da manuelle Getriebe für die betrachteten Absatzszenarien keine wesentliche Rolle spielen.

4.3.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

Bei der Betrachtung der Getriebeherstellung wird der Fokus auf die folgenden sieben Hauptkomponenten gelegt:

- Gehäuse
- Wellen
- Planetenträger
- Zahnräder
- Kegelräder
- Lamellenträger
- Drehmomentwandler

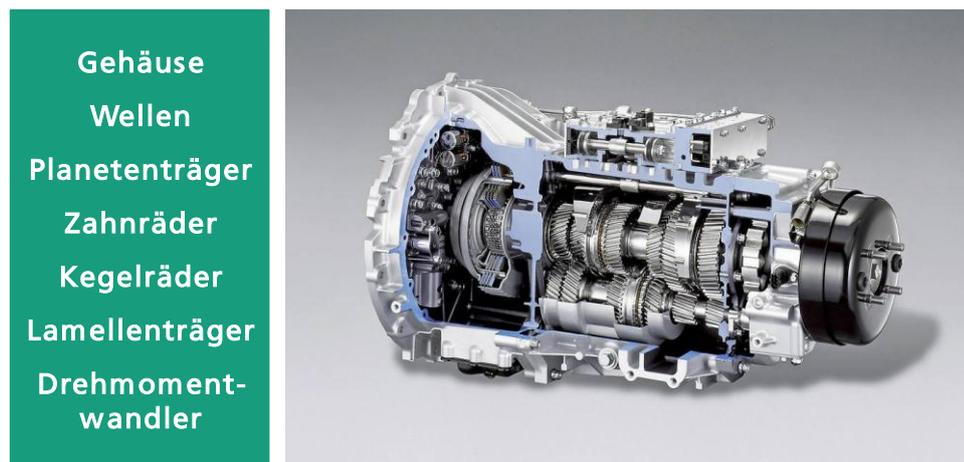


Abbildung 17: Getriebe und betrachtete Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)

Diese und weitere Komponenten werden über verschiedene Vormontagen in Baugruppen vormontiert und je nach Stückzahl in manuellen, hybriden oder automatisierten Getriebe-Endmontagen zum Getriebe zusammengebaut

Wesentliche Herstellprozesse

Die wesentlichen Fertigungsverfahren und Beispiele hierfür sind in Tabelle 5 dargestellt. Ein Unterschied zu der Prozesskette der Motorenkomponenten ist das Induktionshärten, welches häufiger direkt im Fertigungsprozess zwischen einzelnen Bearbeitungen eingesetzt wird. Bei den Motorkomponenten ist dieses Verfahren hingegen weniger anzutreffen.

4.3.2.1 Herstellung der Hauptkomponenten

In einer Grobbetrachtung kann die Herstellung einer der Hauptkomponenten auf die Schritte **Urformen/Umformen, vorbearbeiten, veredeln, feinarbeiten und reinigen, prüfen** reduziert werden. Die Einzelkomponenten werden zum Teil zu einbaufertigen Baugruppen **vormontiert**, die dann in der Endmontage zum fertigen Getriebe **zusammengebaut** werden.

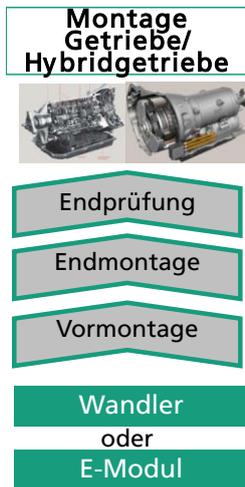


Abbildung 18: Montageprozesse beim Getriebe (Grafik: Fraunhofer IAO)

Stärker als in der Motorenendmontage beeinflusst die mögliche Stückzahl den Automatisierungsgrad. Trotz hoher Varianz in den Endprodukten sind in der Großserienfertigung Getriebemontagen stärker automatisiert.

In den beiden folgenden Abbildungen wird in vereinfachten Prozessketten die Herstellung der Hauptkomponenten eines Getriebes aufgezeigt.

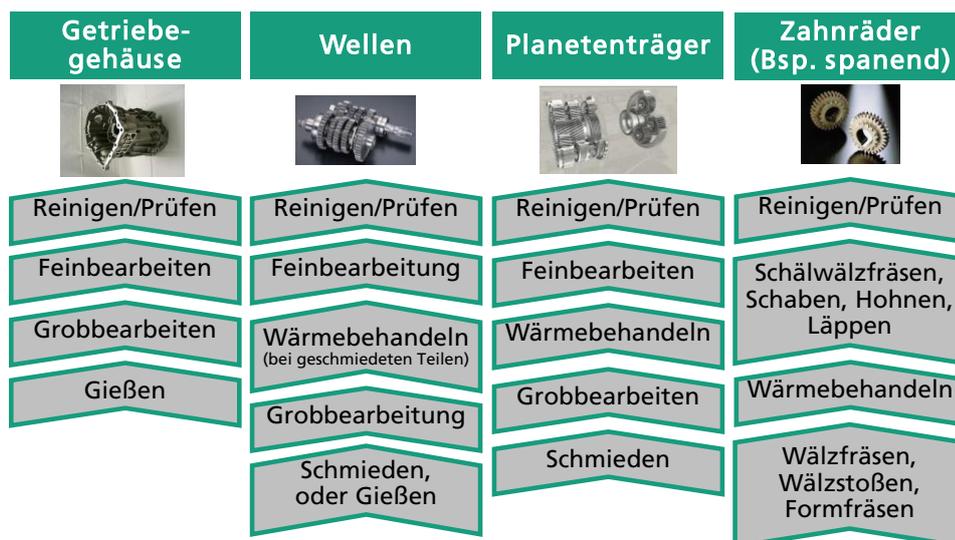


Abbildung 19: Hauptkomponenten in der Getriebeherstellung I (Grafik: Fraunhofer IAO)

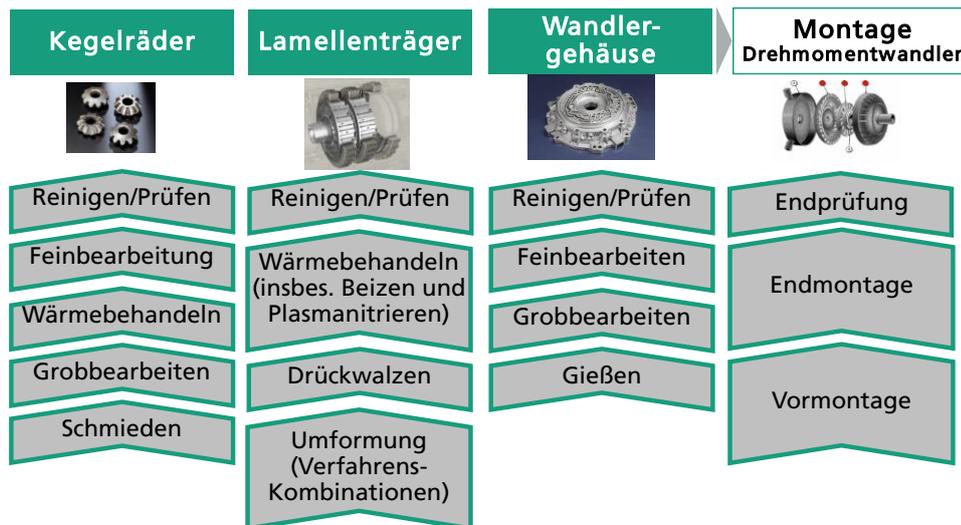


Abbildung 20: Hauptkomponenten in der Getriebeherstellung II (Grafik: Fraunhofer IAO)

Viele Bearbeitungen ähneln denen beim Verbrennungsmotor, auch die Qualifikationsanforderungen an das benötigte Personal sind vergleichbar. Die Gehäusebearbeitung und -entwicklung ist der im Bereich Verbrennungsmotor sehr ähnlich. Bei den verschiedenen Elementen des Innenlebens eines Getriebes kommen neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen zum Einsatz. Hauptzielsetzungen sind hierbei Gewichtseinsparungen und Geräuschreduzierungen.

Wesentlich ist beim Getriebe die Räder bzw. - Verzahnungsherstellung. Ur- und umformtechnisch hergestellte Zahnräder besitzen ohne den Einsatz spezieller Nachbehandlungsverfahren meist nur eine geringe Festigkeit und Verzahnungsqualität. Leistungs- und Laufverzahnungen mit hohen Festigkeits- und Qualitätsanforderungen für Getriebe werden daher in den meisten Fällen spanend hergestellt. Die **umformtechnische** Zahnradfertigung bietet Vorteile hinsichtlich der Fertigungskosten, der Material- und Energieausnutzung, hat sich aber in der Industrie aufgrund der komplexen Bauteil- und Matrizenform bis heute nicht etabliert.

Durch die **Pulvermetallurgische** Zahnradfertigung können geometrisch komplexe Bauteile bei hohen Stückzahlen kostengünstig und qualitätstreu hergestellt werden. Sinterteile besitzen jedoch aufgrund der verfahrensbedingten Restporosität eine reduzierte Festigkeit.

Wälzfräsen ist wegen seiner hohen Wirtschaftlichkeit das dominierende spanende Fertigungsverfahren zur Herstellung außenverzahnter, zylindrischer Zahnräder. Bei Innenverzahnung sowie Außenverzahnung mit benachbarten Störkonturen wird das **Wälzstoßen** eingesetzt. Gängige spanende Feinbearbeitungsverfahren sind das **Schälwälzfräsen** einsatzgehärteter Zylinderräder und das **Schaben**.

Die Grundform von **Lamellenträgern** wird durch eine umformtechnische Verfahrenskombination erzeugt und anschließend durch Drückwalzen und Wärmebehandlung fertiggestellt.

Beim **Drückwalzen** wird eine rotationssymmetrische Vorform in Drehbewegung versetzt, welche an dem Drückwalzdorn in axialer Richtung fixiert wird. Durch die radiale sowie axiale Druckeinwirkung der örtlich am Umfang der Vorform angreifenden Walzen, wird der Werkstoff plastisch verformt. Die Außenkontur des Lamellen-

trägers wird dabei von den radialen Bewegungen der Walzen bestimmt. Die Innenkontur des Werkstückes wird direkt vom Drückwalzdorn abgeformt. Beim Drückwalzen werden zwei Verfahrensvarianten entsprechend der axialen Fließrichtung des Werkstoffs unterschieden, „Drückwalzen im Gleichlauf“ und „Drückwalzen im Gegenlauf“.

Die Wärmebehandlung erfolgt durch **Beizen oder Plasmanitrieren** in einer Atmosphäre aus Stickstoff und Wasserstoff und der Beimischung unterschiedlicher Gase. Hieraus resultieren Bauteile mit hoher Randschichthärte, Verschleißwiderstand und Korrosionsbeständigkeit.

4.3.2.2 Trends in der Herstellung der Hauptkomponenten

Wie bei den Verbrennungsmotoren wird auch bei den Getrieben stark an neuen Werkstoffen und deren Kombination geforscht. Der Trend zu immer höheren Gangzahlen ist von verschiedenen Einflüssen abhängig. Das Downsizing bei den Verbrennungsmotoren kann hier unter Umständen eine weitere Erhöhung der Gangzahlen erforderlich machen. Bei den Hybridantrieben können vorhandene Gangstufungen der Getriebe bei größerer Spreizung durchaus ausreichend sein (Steinberg, Müller, & Dahl, 2012), wogegen sich bei reinen Elektroantrieben mit Ein- oder Zwei-Gang- (Symposium, 2011) oder stufenlosen Getrieben zu rechnen ist. Doppelkupplung und Start-Stopp-Technologien können bereits heute als Stand der Technik bezeichnet werden.

Neben den mit der Werkstoffforschung einhergehenden Innovationen bei den Fertigungsverfahren, die erhebliche Kostenpotenziale beinhalten, sind weitere Fortschritte bei den Getrieben im Leichtbau und in der Reduzierung der Reibungsverluste zu erwarten.

4.4 Elektrische Maschine

4.4.1 Produkttypologie

4.4.1.1 Einführung

Die meisten Elektroantriebe können sowohl als Motor wie auch als Generator zur Energierückgewinnung betrieben werden. Aus diesem Grund wird häufig der Begriff „elektrische Maschine“ anstelle von Elektromotor verwendet. In der Funktion kann die elektrische Maschine den Verbrennungsmotor als Antriebsquelle erweitern und verbessern oder sogar ganz ersetzen. Ersteres ist beispielsweise der Fall bei einer Verbesserung des Wirkungsgrades der Verbrennungskraftmaschine im Teillastbereich bei Hybriden. Eine gänzliche Substitution des Verbrennungsmotors durch den elektrischen Antrieb findet sich beispielsweise in den Konzepten des Range-Extenders, dem rein batterieelektrischen Fahrzeug oder dem Brennstoffzellen-Fahrzeug wieder (Spath, et al., 2011).

Die für die Anwendung im Automobil eingesetzten Ausführungen elektrischer Maschinen stellen in der Regel Drehstrommaschinen (auch Wechselstrommaschinen) dar, welche von einem 3-phasigen Wechselstrom betrieben werden. Dabei sind die Drehfeldwicklungen im Stator (auch Ständer) des Motors angebracht. Die drei Wechselspannungen des Drehstroms sind hierbei jeweils um 120 Grad versetzt. Jede der drei Phasen des Wechselstroms durchfließt je ein im Stator angebrachtes Spulenpaar und erzeugt so ein Magnetfeld, welches im Takt des Wechselstroms umgepolt wird. Als Resultat ergibt sich hierdurch ein gemeinsames rotierendes Magnetfeld welches wiederum eine Kraft auf den in der Mitte drehenden Rotor der Maschine bewirkt (Honsel & Flohr, 2012). Der von der Traktionsbatterie des Fahrzeugs bereitgestellte Gleichstrom muss hierfür in einen 3-phasigen Wechselstrom gewandelt werden. Erst dann kann der Elektromotor situationsgerecht angesteuert werden. Für die Umsetzung dieses Schrittes sind sogenannte Inverter (oder Pulswechselrichter) notwendig (Spath, et al., 2011).

Die elektrische Maschine eignet sich aufgrund ihrer Drehmomentcharakteristik hervorragend für einen Einsatz als Antriebsmotor in Fahrzeugen. Bereits ab Drehzahl 0 steht dem Antrieb das maximale Drehmoment zur Verfügung. Dieses kann bis zu einer gewissen Drehzahl konstant gehalten werden. Erst im sogenannten Feldschwächebereich reduziert sich das Drehmoment. Als weitere Vorteile lassen sich ein im Vergleich zum Verbrennungsmotor deutlich höherer Wirkungsgrad nennen (bis 95%). Zudem können die Möglichkeit zur Rekuperation, die Robustheit und die hohe Lebensdauer der Komponente, relativ geringe Wartungskosten und relative Geräuscharmut als weitere Vorzüge angeführt werden. Darüber hinaus kann der Motor eine gewisse Zeit auch über der eigentlichen Nennleistung (Überlastbereich) betrieben werden ohne Schaden zu nehmen (Spath, et al., 2011).

4.4.1.2 Motortypologie und Ausführungsformen elektrischer Maschinen

In der Gruppe der Drehstrommotoren kann gemäß dem Laufverhalten von Stator und Rotor grundsätzlich zwischen zwei Konzepten, der **Synchron-** und der **Asynchronmaschine**, unterschieden werden (Honsel & Flohr, 2012).

Beim Konzept der Asynchronmaschine besteht zwischen der Felderzeugung des Magnetfeldes im Rotor und im Stator ein Zeitverzug. Der Rotor läuft aus diesem Grund zeitlich verzögert und damit asynchron. Die Vorteile dieser Ausführungsform liegen in einem relativ einfachen Aufbau und einer einfachen Regelung sowie darin, dass keine teuren Magnetmaterialien zum Einsatz kommen.

Vorteile des Synchronmotors hingegen liegen in einem im Vergleich zur Asynchronmaschine höheren Wirkungsgrad und einer gesteigerten Leistungsdichte (Dempewolf, 2011). Anders als bei der Asynchronmaschine folgt die Drehzahl des Rotors der vorgegebenen Frequenz und dem magnetischen Drehfeld im Stator synchron, was wiederum einen gesteigerten Regelaufwand erfordert. Der Rotor kann bei dieser Ausführungsform der elektrischen Maschine sowohl mit teuren Permanentmagneten, welche entweder in vergrabener Form oder als Oberflächen-Magnete angebracht sein können, oder aber durch eine Fremderregung in Spulen konzipiert sein. Bei letzterem wird ein Magnetfeld durch stromdurchflossene Spulen erzeugt, was wiederum zu Lasten des Wirkungsgrads der elektrischen Maschine geht (Spath, et al., 2011).

In Abhängigkeit der beschriebenen Motortopologien ergeben sich spezifische Rotor- und Statorkonstruktionen, welche zu verschiedenen Ausführungsformen elektrischer Maschinen führen. Eine Unterscheidung kann grundsätzlich in Asynchronmaschine (ASM), permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM), stromerregte Synchronmaschine (SSM) und in synchrone Reluktanzmaschine (SyR) vorgenommen werden (Freialdenhoven, 2009), (Mathoy, 2010), (Hofmann P., 2010). Grundsätzlich müssen bei der Auswahl eines geeigneten Antriebskonzepts für Elektro- und Hybridfahrzeuge unterschiedliche Faktoren beachtet werden. Bei der Auslegung des Antriebs muss letztlich eine Systemabstimmung von Motor, Leistungselektronik und Getriebe erfolgen, um so ein Optimum bei Kosten, Gewicht, Leistungsdichte und Wirkungsgrad sowie Sicherheit und Zuverlässigkeit zu erzielen (Spath, et al., 2011).

Im Rahmen des ELAB-Forschungsprojektes wurde insbesondere die PSM in den Topologieformen der konzentrierten Wicklungen (für den Elektromotor Hybrid) sowie verteilten Wicklungen (für den regulären Elektromotor sowie elektrischen Generator) untersucht.

Permanenterregte Synchronmaschine (PSM)

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine findet derzeit sehr große Verwendung bei Hybriden. Weiterhin wird sie vermehrt als reiner Traktionsmotor eingesetzt. Dabei ähnelt der Statoraufbau der PSM dem der Asynchronmaschine. Bei den Wicklungen können hier sowohl verteilte Wicklungen als auch sogenannte konzentrierte Wicklungen zum Einsatz kommen. Der Rotor (auch Läufer oder Polrad) weist bei dieser Ausführungsform eine Besonderheit durch die Verwendung von Permanentmagneten auf. In Form von sogenannten Oberflächenmagneten können diese entweder an der Oberfläche des Rotors fixiert sein oder aber als vergrabene Magneten in Taschen innerhalb des Läufers angebracht sein. Bei Kennwerten wie Drehmoment und Leistung zu Aktivmasse bzw. Wirkungsgrad werden die Vorteile dieser Ausführungsform gegenüber der Asynchron- oder geschalteten Reluktanzmaschine deutlich (Dempewolf, 2011). Der relativ einfache mechanische und elektrische Aufbau der Maschine (keine Bürsten, keine Schleifkontakte, keine komplizierten Wicklungen) können als weitere Vorteile gesehen werden. Durch die Verwendung von Seltenen Erden (Nd-Fe-B-Magneten) ist eine sehr kompakte Bauart möglich, kompakter noch als bei fremderregten Synchronmaschinen. Nachteile bergen allerdings die sehr hohen Materialkosten und anhaltende Diskussionen über die Abhängigkeit von Materiallieferanten. Weiterhin erfordert diese Ausführungsform der elektrischen Maschine einen kostspieligen Rotorlagegeber. Zusätzlich weisen die permanentmagneterregten Ausführungen ein, durch den Magnetgehalt definiertes Grenzmoment auf. Im hohen Drehzahlbereich werden hohe Blindstromkomponenten vom Umrichter erforderlich. Auch sehr hohe Kurzschlussströme oder Leerlaufspannungen können bei Umrichterdefekten auftreten (Freialdenhoven, 2009), (Mathoy, 2010), (Hofmann P., 2010).

4.4.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

4.4.2.1 Übersicht und Gesamtbetrachtung

Die Herstellung von Elektromotoren stellt kein gänzlich neues Anwendungsfeld dar. Für stationäre Zwecke aber auch für Nebenanwendungen im Automobil werden jährlich Millionen von Motoren produziert. In der Herstellung von Elektromotoren für die automobilen Antriebstechnik ist daher davon auszugehen, dass sich weniger die einzelnen Prozessschritte verändern werden, sondern dass in der Zukunft vielmehr Optimierungen von Produktionstechnologien und deren Adaption auf eine Serienfertigung erarbeitet werden müssen (Schlick, Hertel, Hagemann, Maiser, & Kramer, 2011). Anders als bei stationären Anwendungen, müssen im Automobilbau Anforderungen in der Produktion erfüllt werden, welche bisher weniger stark im Fokus standen. Diese sind zum einen eine erhöhte Lieferqualität (100 ppm) und -treue (100%), sowie eine erhöhte Prozessautomatisierung (Lohanteil etwa 5%) (Franke, 2011). Weiterhin müssen an Faktoren wie der Leistungsdichte, dem Leistungsgewicht sowie an den Komponentenkosten Optimierungen vorgenommen werden, um den hohen Anforderungen für den Serieneinsatz im automobilen Antriebsstrang gerecht zu werden.

Die Prozesskette für die Herstellung der elektrischen Maschine lässt sich prinzipiell in die **Stator-** und **Rotorproduktion**, die **Gehäuseherstellung** sowie die **Endmontage** unterteilen (Fleischer, 2011). Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Zusammenspiel einzelner Prozessschritte, Bauteile und Baugruppen auf dem Weg zur abschließenden Endmontage der elektrischen Maschine.

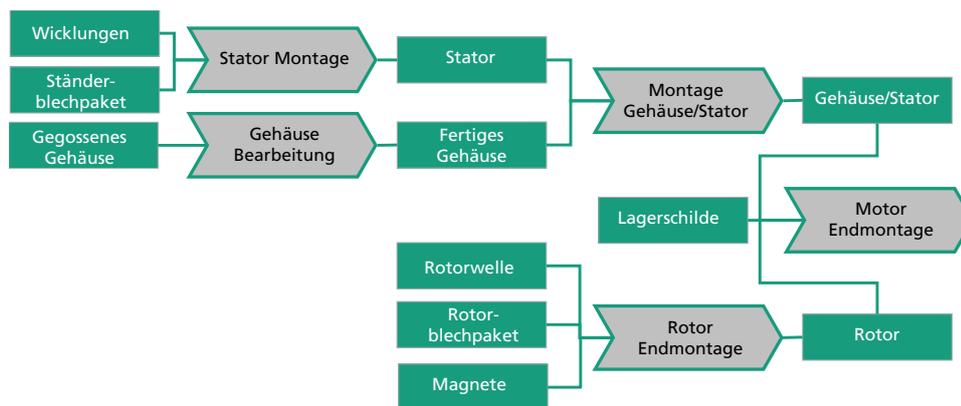


Abbildung 21: Vereinfachte Darstellung wesentlicher Prozessschritte und Baugruppen in der Herstellung der elektrischen Maschine (Grafik: Fraunhofer IAO)

Bei genauerer Betrachtung lassen sich die bereits grob skizzierten Schritte weiter unterteilen. Abbildung 22 stellt die für die Leitungserstellung notwendigen Einzelprozessschritte detailliert dar. Hierbei wird ersichtlich, dass nicht nur klassische Fertigungs- und Montagetechniken sondern auch eine Vielzahl an Prüf- und Messvorgängen notwendig sind, um die Maschine gemäß den erforderlichen Anforderungen herzustellen.

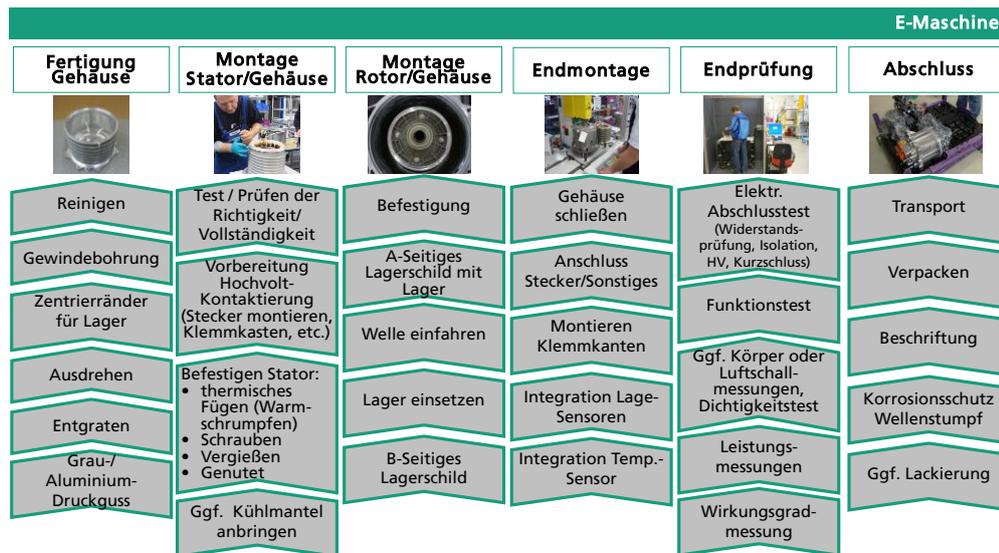


Abbildung 22: Fertigungs-, Montage- und Prüfverfahren in der Herstellung einer elektrischen Maschine (Grafik: Fraunhofer IAO)

Im Folgenden werden die wesentlichen Prozessschritte der Stator- und Rotorfertigung sowie der Gehäuseherstellung und Endmontage der elektrischen Maschine beschrieben und hinsichtlich eingesetzter Produktionstechnologien untersucht. Ein weiterer Fokus der nachfolgenden Betrachtung liegt auf der Herausarbeitung potentiell einsetzbarer Produktionstechnologien in einer zukünftigen automobilen Großserie.

4.4.2.2 Statorherstellung

Sowohl in der Stator- wie auch in der Rotorfertigung werden die Bleche für die Blechpaketherstellung in der Regel mit dem **Stanzverfahren** hergestellt. Da sich diese Blechpakete mit einem Vorgang erzeugen lassen, kann die Produktion beider (gegenläufiger Teile) zusammen in einem Stanzvorgang erfolgen. Dabei werden allerdings enorm hohe Anforderungen an die Güte der gestanzten Teile (vor allem an den Kantenbereichen) gelegt. Aktuelle Diskussionen um den Einsatz der **Laserschneid-Technologie** werden derzeit kontrovers diskutiert. Relativ hohe Kosten für den Einsatz dieser Technologie und auch die Sicherstellung der sehr hohen Qualitätsanforderungen können als Kritikpunkte aufgeführt werden. Generell gehen die Bestrebungen dahin, durch eine Reduzierung der Blech- und Blechpaketdicken weiter an Effizienzerhöhungen zu arbeiten. Nachfolgend sind die wesentlichen Prozessschritte in der Statorherstellung dargestellt.



Abbildung 23: Wesentliche Prozessschritte in der Statorherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Als weitere wichtige Vorgänge in der Herstellung elektrischer Maschinen kann das **Wickeln** und das **Einziehen** der Spulen (bei verteilten Wicklungen) oder die Montage der Wicklungen innerhalb der Statorfertigung verstanden werden. Je nach Topologie und Auslegung der elektrischen Maschine kommen hier verschiedene Techniken zum Einsatz (siehe auch nachfolgende Abbildung). Ziele in der Weiterentwicklung der Wickelverfahren liegen zum einen in der Steigerung der Wirtschaftlichkeit (Taktzeiten, Erhöhung des Füllgrades) oder beispielsweise in der Optimierung der Prozessabläufe hinsichtlich der Qualitätsanforderungen (keine Beschädigung der Drahtisolation, sichere Drahtführung) (Fleischer, 2011).

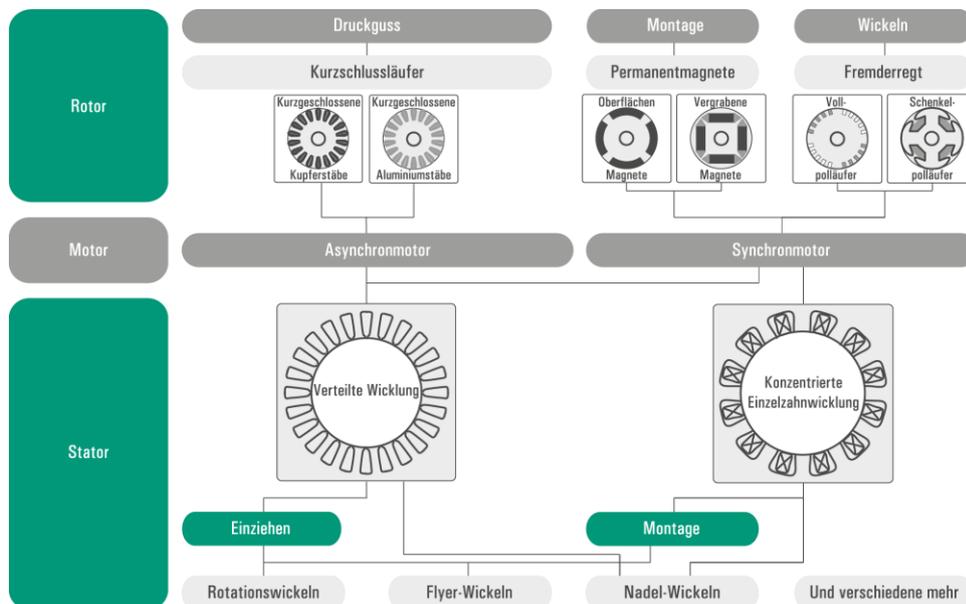


Abbildung 24: Motortopologien und Wickelverfahren im Bereich elektrischer Maschinen (Grafik: Fraunhofer IAO, in Anlehnung an (Franke, 2011))

Für elektrische Maschinen werden derzeit nahezu ausschließlich **verteilte Wicklungen** oder **konzentrierte Einzelzahnwicklungen** diskutiert und eingesetzt. Als Wickeltechniken stehen hierfür beispielsweise das **Nadel-Wickeln**, das **Flyer-Wickeln** oder das **Rotationswickeln** zur Verfügung (Hagedorn, 2011). Diese Techniken bieten je nach Aufbau des Stators und der Art der Wicklungen gewisse Vorteile und müssen für den jeweiligen Einsatzfall ausgewählt werden.

Ebenfalls lässt sich eine Vielzahl an Kontaktierungsmethoden je nach Anwendungsfall nutzen. Diese reichen von **Schweißtechniken**, wie dem **Widerstands-** oder **Bogenschweißen**, über das **Löten** bis hin zu **Schneidklemmstecker** und **Steckverbindungen**.

Um Effizienzsteigerungen bei den Leistungskennwerten, aber auch um Kosteneinsparungen an der elektrischen Maschine durch einen möglicherweise reduzierten Einsatz von Kupfer, zu erreichen, wird derzeit verstärkt an der Reduktion der Luftzwischenräume bzw. an der Maximierung des Windungsfüllfaktors gearbeitet. Zu einem großen Teil lässt sich dies durch die Auswahl einer geeigneten Wickeltechnik beeinflussen. Dennoch stoßen diese mit den in der Regel verwendeten runden Ausführungen der Kupferdrähte an Grenzen. Prinzipiell ergeben sich mehrere Möglichkeiten um eine Steigerung des Füllfaktors zu erreichen. Zum einen können profilierte Drähte verwendet werden. Hierbei wird zwischen zwei Profilen (rechteckig und hexagonal) unterschieden.

Die Verwendung von **rechteckigen** Profilen (siehe nachfolgende Abbildung) kann bei größeren Drahtdurchmessern (links) von Vorteil sein. Bei dünneren Drähten mit halb runden Ecken (rechts) nimmt jedoch der Füllfaktor im Vergleich zu dem Einsatz von dickeren Drähten ab. Beide Ausführungsformen stellen hohe Anforderungen an den Wickelprozess. Reduzierte Wickelgeschwindigkeiten und erhöhte Investitionen in das benötigte Anlagenequipment reduzieren die Attraktivität dieses Ansatzes für einen wirtschaftlichen Großserieneinsatz. Einsatzmöglichkeiten werden hier vor allem in der Produktion von sehr hochwertigen Einheiten kleinerer Stückzahlen gesehen (Jaksic, 2011).

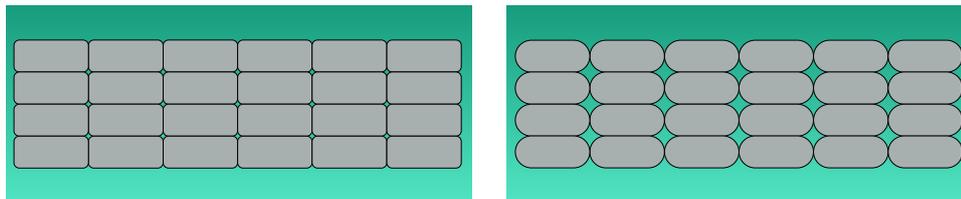


Abbildung 25: Rechteckig-profilierter Drähte mit dicker Drahtausführung (links) und dünner Drahtausführung (rechts) (Jaksic, 2007)

Auch die Ausführungsform der **hexagonalen Anordnung** (sog. Honeycomb) führen Nachteile wie eine sehr aufwändige Umrüstung des Wickel-Equipments und eine reduzierte Wickelgeschwindigkeit mit sich und eignen sich somit ebenfalls nur bedingt für eine wirtschaftliche Großserienfertigung (Jaksic, 2011).

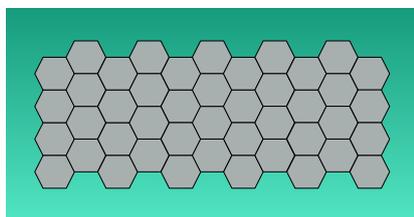


Abbildung 26: Profilierte Drähte, hexagonale Anordnung (Jaksic, 2007)

Zur Umgehung der Problematik formierter Drahtausführungen, werden Ansätze erforscht die preiswerteren runden Kupferdrähte nach dem Wickeln zu formen und so eine Steigerung des Füllfaktors zu erreichen. Diskutierte Ansätze sind hierbei die **Formänderung** durch direkte **mechanische Einwirkung** oder beispielsweise Formänderung bzw. Beeinflussung durch **Hochdruckbeschichtungs-Verfahren**, **Hydromechanisches-Formen** oder **Explosionsformen**. Dabei ist anzumerken, dass

sich die Entwicklungspfade und Fortschritte dieser Technologien deutlich unterscheiden und nur bedingt für eine Serienherstellung eignen bzw. die Forschungsanstrengungen sich noch im Anfangsstadium befinden (Jaksic, 2011). Als ein weiterer Schritt, welcher auf dem Weg zu einer wirtschaftlichen Großserienfertigung optimiert werden muss, stellt sich insbesondere das Abisolieren und Schalten (i.d.R. durch **Löten** oder **Crimpen**) der Wicklungen bei verteilten Wicklungen dar. Herausforderungen bestehen hierbei in der Etablierung eines automatisierten Prozesses, welcher den Anforderungen einer Großserie entspricht. Der verstärkte Einsatz von **Industrierobotern** und neuartige Automatisierungsansätze könnten zukünftig zu weiteren Produktivitätssteigerungen in der Herstellung führen. Eine Auswahl möglicher Optionen stellen dabei die **ambidextere Wicklungsmontage** (2-Arm-Roboter) für die flexible Motorenfertigung, die direkte Bewicklung und Verschaltung von Statorn mittels **Tripod** (dreiaxiale Kinematik) oder weitere Prozessgestaltungen mit hochdynamischen **Parallelkinematiken** dar (siehe nachfolgende Abbildung) (Franke, 2011), (Dobroschke & Kuehl, 2011).



Abbildung 27: Aktuell beforschte Automatisierungslösungen in der Fertigung elektrischer Maschinen (Franke, 2011), (Dobroschke & Kuehl, 2011)

Exkurs: Spulherstellung mittels des Gießverfahrens - Alternative zum Wickeln

Forscher vom Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM erforschen das **Gießen** von Wicklungen. Hierzu werden flache Wicklungen gegossen und dann isoliert. Diese werden anschließend in Form gebracht. Vorteile des Verfahrens liegen in der Erhöhung des Füllfaktors (Füllfaktor von bis zu 90%) und damit in einer Steigerung des Wirkungsgrads sowie in einer Reduzierung der Herstellkosten. Neben Kupfer als Spulmaterial können ebenfalls Werkstücke aus Aluminium hergestellt werden. Dem Nachteile einer geringeren Leitfähigkeit von Aluminium im Vergleich zu Kupfer stehen Vorteile wie Kosteneinsparungen beim Material oder ein niedrigeres Spulengewicht gegenüber (Gröninger, et al., 2011). Weiterhin könnten sich die niedrigeren Prozesstemperaturen beim **Gießprozess** in einer gesteigerten Energieeffizienz im Verfahrensablauf niederschlagen.

Beim notwendigen Imprägnieren der Wicklungen bzw. des Stators (Vakuumimprägnieren), welches vermehrt durch Heißtauchverfahren realisiert wird, werden derzeit alternative Ansätze wie das **Plasmabeschichten** diskutiert (Gröninger, et al., 2011). Das präzise Einbringen des Harzmediums in den Spulenkörper, welches darauf abzielt Lufteinschlüsse zu vermeiden, stellt dabei hohe Anforderungen an den Prozess. Weiterhin erfordert das Fixieren und Bandagieren des Wickelkopfes sowie eine Automatisierung des Vakuumprozesses weitere Prozessverbesserungen (Möbius F., 2011).

4.4.2.3 Rotorproduktion

Wie zuvor beschrieben stehen unterschiedliche Rotorkonstruktionen, in Abhängigkeit von der Motortopologie der elektrischen Maschine, zur Verfügung. Im Forschungsvorhaben ELAB wird die Ausführungsform der permanentenregten Syn-

chronmaschine (PSM) näher betrachtet. Wesentliche Prozessschritte in der Herstellung dieser Komponente stellen die Erzeugung des Rotor Blechpakets, die Fertigung der Rotorwelle, die Bestückung des Stators mit Permanentmagneten, die Verbindung von Welle und Rotor sowie das Bandagieren und abschließende Prüfen und Wuchten der fertigen Einheit dar.

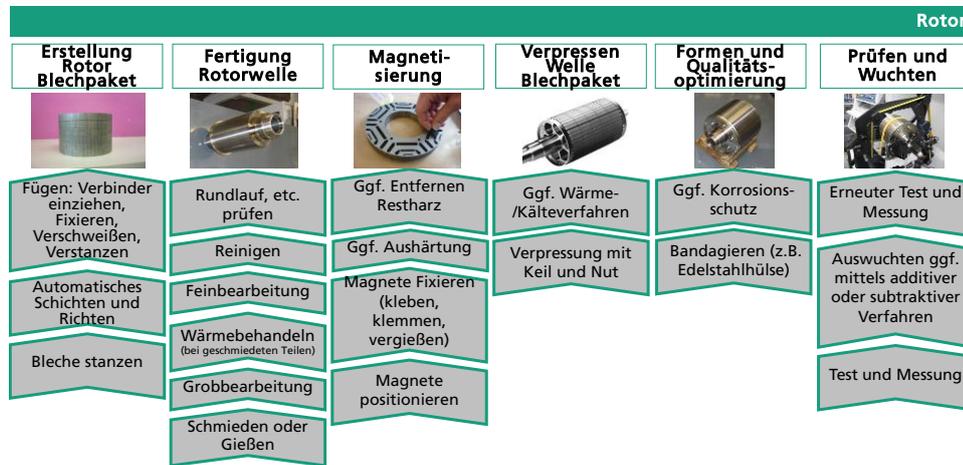


Abbildung 28: Wesentliche Prozessschritte in der Rotorherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Zur Erstellung des **Rotor Blechpakets** werden zunächst mittels des Stanzverfahrens (siehe auch 4.4.2.2) die Bleche gestanzt. Hierfür stehen verschiedene Blechsorten, wie Dynamoblech, Hochfrequenzblech oder Vacoflux (VAC) zur Verfügung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Blechstärke und ihrer Zusammensetzung sowie den daraus resultierenden elektrischen Eigenschaften. Eine Auswahl des Blechmaterials muss je nach Anwendung und unter Berücksichtigung der Ummagnetisierungsverluste und Kostenaspekten erfolgen (Dempewolf, 2011).

Die sich der Erstellung der Rotor Blechpakete anschließende **Fertigung der Rotorwelle** startet mit dem Schmieden oder Gießen der Welle. Nach einer Grobbearbeitung erfolgt bei geschmiedeten Rotorwellen die Wärmebehandlung. Daran anschließend wird die Feinbearbeitung durchgeführt. Nach dem Reinigen wird die Welle einer Prüfung hinsichtlich des Rundlaufverhaltens unterzogen.

Als weiterer wichtiger Kernprozess kann die **Magnetmontage** am Rotor bei der permanenterregten Synchronmaschine (PSM) gesehen werden. Diese stellt sehr hohe Anforderungen an die **Handhabungs- und Automatisierungstechnik**. Das Aufbringen des Klebers und die hierfür erforderliche Dosierungs-technik können als kritische Aspekte gesehen werden. Hierbei müssen sowohl Position wie auch Menge des Klebmediums exakt bestimmt und aufgebracht werden. Vor dem Aufbringen der Magnete am Rotor müssen diese gereinigt werden. Hierfür kann beispielsweise das **CO₂-Schneestrahilverfahren** eingesetzt werden. Der eigentliche Vorgang der Magnetbestückung wird dann in der Regel von Robotern realisiert.

Vorteilig bei der „Nicht-Verwendung“ von Permanentmagneten wäre eine Vereinfachung von Montage und Handhabungsvorgängen durch Wegfall dieses Automatisierungsproblems bzgl. der Magnethandhabung (insbesondere bei Oberflächenmagneten) (Fleischer, 2011). Generell bietet die PSM Ausführung gegenüber der Asynchronmaschine oder der geschalteten Reluktanzmaschine Vorteile bei Kennwerten wie Drehmoment und Wirkungsgrad. Steigende Preise bei den für die Magnete benötigten seltenen Erden und die derzeitige Abhängigkeit vom Hauptlieferanten China stellen den Einsatz von Magneten als zukünftige Musterlösung

immer häufiger in Frage (Dempewolf, 2011). Hier muss sich in den kommenden Jahren zeigen, welche Motorenkonzepte sich durchsetzen werden. Erste Hersteller wie beispielsweise Toyota arbeiten bereits heute schon verstärkt an Motorausführungen ohne Magnete (Wimmelbücker, 2012). Anders als in dem hier beschriebenen Prozessablauf sieht Franke eine Magnetisierung nach dem Wuchten als vorteilhaft an, da hierdurch eine vereinfachte Handhabung erfolgen kann (Franke, 2011).

Der Magnetisierung schließt sich in diesem Fall das Verpressen der Welle mit dem Blechpaket an. Nach diesem Schritt wird das Paket aus Welle und Blechpaket bandagiert bevor man es den Funktionstests unterzieht. Nach dem Auswuchten erfolgen dann erneute Tests und Messungen bevor der fertige Rotor zur Endmontage freigegeben werden kann.

4.4.2.4 Endmontage und -Prüfungen

Bei der abschließenden Endmontage des Elektromotors besteht weiterer Optimierungsbedarf in den Prozessen. Wie beispielsweise auch der bereits in der Statorproduktion erfolgte Prozess „Einschrumpfen des Stators in das Innengehäuse“ erfordert nun das „Zusammenführen des im Innengehäuse eingebrachten Stators mit dem in das Außengehäuse gefügten Rotors“ eine schadensfreie und exakte Montage, welche zukünftig weiter automatisiert und wirtschaftlich gestaltet werden muss (Möbius F. , 2011).

Nach heutigem Stand der Technik wird hierfür der Stator mittels Schnellverschlüssen fixiert. Anschließend wird der Rotor in die Statorkonstruktion eingebracht (Baumeister & Stattler, 2009). Herausforderungen werden hier vor allem im Vorgang des halbautomatischen Fügens gesehen. Hierbei muss vermieden werden, dass der Rotor an das Statorblechpaket anschlägt oder es zu einer Beschädigung der Dicht- ringe der Gehäusehälften kommt. Zudem müssen unzulässige Belastungen der Lager sowie Beschädigungen der elektrischen Leitungen vermieden werden (Möbius F. , 2011). Ferner erfolgt die Integration von Temperatur- und Lagesensor sowie der Anschluss weiterer relevanter Stecker bevor das Gehäuse zur Endprüfung geschlossen wird.

Die Endprüfungen können neben den Wirkungsgrad- und Leistungsmessungen auch weitere Tests, wie Körper-, Luftschallmessungen oder Dichtigkeitstests umfassen. Weiterhin ist der Funktionstest wichtiger Bestandteil des Prüfvorgangs. Hierbei werden für die Funktionsfähigkeit der elektrischen Maschine relevante Betriebspunkte angefahren. Abschließend erfolgt der elektrische Abschlusstest (Widerstandsprüfung, Isolation, Hochvolt, Kurzschlussprüfung) bevor die funktionsfähige Einheit beschriftet (Graviert), verpackt und abtransportiert wird. Eine Lackierung sowie die Aufbringung eines Korrosionsschutzes des Wellenstumpfs können zudem Bestandteile der finalen Tätigkeiten sein.

4.5 Traktionsbatterie

4.5.1 Produkttypologie

Das Forschungsvorhaben ELAB thematisiert in erster Linie die Lithium-Batterie. Diese birgt auf Grund ihrer recht hohen Energiedichte (50 bis 200 Wh/kg) sowie Leistungsdichte (bis zu 5.000 W/kg) großes Potential für den Einsatz in Hybrid- und rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Weiterhin spricht die relativ hohe Zyklenfestigkeit (etwa 3.000 Zyklen bis 80 Prozent Entladungsgrad (DoD) sowie eine hohe Zykleneffizienz (etwa 96 Prozent bei 80 Prozent DoD) für einen serienmäßigen Einsatz im Fahrzeug (Spath, et al., 2011). Der Aufbau einer Batteriezelle besteht aus zwei Elektroden, einer negativen Anode und einer positiven Kathode. Diese sind mittels eines Separators getrennt. In Abhängigkeit des verwendeten Elektrodenmaterials sowie des Separators und des Elektrolyten lassen sich wieder aufladbare Lithium-Batterien in Lithium-Ionen-Batterien (Lithium-Ion mit flüssigem Elektrolyt sowie Lithium-Ion-Polymer mit Gелеlektrolyt) und Lithium-Metall-Batterien (Lithium-Metall mit flüssigem Elektrolyt sowie Lithium-Polymer mit Polymerelektrolyt) unterteilen (Spath, et al., 2011).

Neben Unterschieden in der eigentlichen Zellchemie kann auch eine Unterscheidung hinsichtlich des Zelltyps vorgenommen werden. Kamen in der Vergangenheit vermehrt Rundzellen zum Einsatz so wird derzeit verstärkt die Verwendung von prisma-tischen Zellen beforscht.

Bedingt durch den Zielkonflikt zwischen der Leistungs- und Energiedichte lassen sich die Batterien weiterhin in sogenannte Hochenergie- und Hochleistungsbatterien unterteilen. Stehen bei der ersten eine hohe Reichweite im Vordergrund, so erlaubt die zweite eine erhöhte Leistungsauf- und abnahme, welche beispielsweise bei Boost- oder Rekuperationsvorgängen Vorteile bietet.

Für eine Verwendung der Batteriezellen im Fahrzeug müssen die einzelnen Zellen zu sogenannten Batteriemodulen über eine gewöhnliche Reihenschaltung zur Spannungserhöhung zusammengefasst werden. Mehrere Module werden wiederum zur Kapazitätserhöhung zu einem Batteriesystem zusammengefasst (Blazejak, 2009). Übliche Spannungswerte derzeitig verbauter Batteriesysteme betragen bis zu 400 Volt. Die nachfolgende Abbildung stellt die einzelnen Wertschöpfungsstufen von der Batteriezelle über das Batteriemodul bis hin zum Gesamtsystem dar.



Abbildung 29: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)¹

¹. Bildmaterial: (Saftbatteries, 2011), (cleanthinking, 2011), (SB LiMotive, 2011)

Neben den Batteriezellen, welche zu Zellmodulen zusammengefasst werden, erfordert ein gesamtes Batteriesystem eine Vielzahl weiterer Komponenten. Zu nennen sind hier Elemente für den elektronischen, elektrischen, thermischen und mechanischen Zusammenschluss. Einen Überblick über den Umfang der im System erforderlichen Komponenten und der damit einhergehenden Komplexität des Batteriesystems ermöglicht die nachfolgende Abbildung.

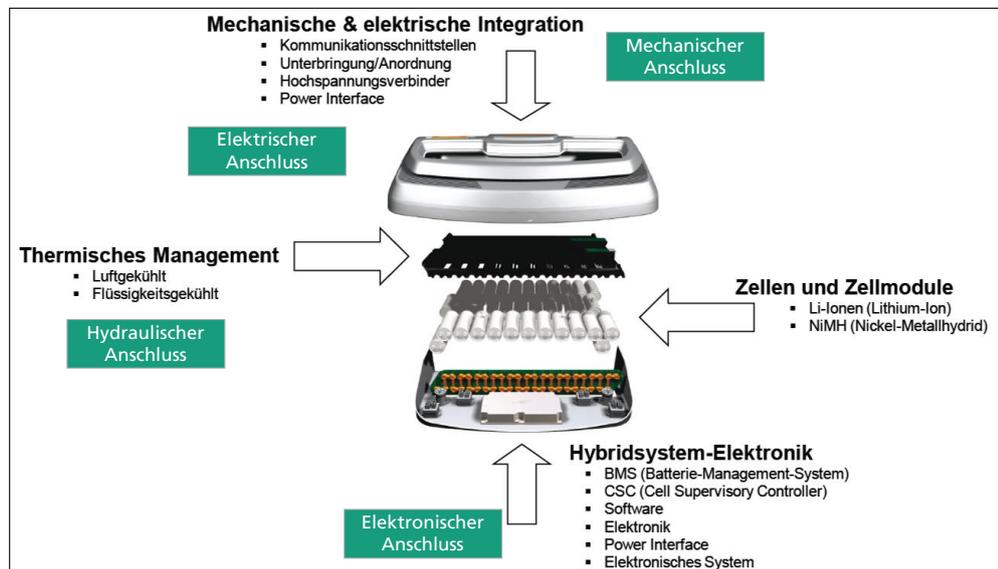


Abbildung 30: Das Batteriesystem und dessen Komponenten (Grafik: Fraunhofer IAO, in Anlehnung an (Rosenkranz, 2009))

4.5.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

4.5.2.1 Übersicht und Gesamtbetrachtung

Bei der Herstellung des Batteriesystems steht die Prozesskette der Modulfertigung sowie die daran anschließende Batteriesystem-Montage und –Integration im Zentrum der Betrachtung. In erster Linie lässt sich feststellen, dass die derzeitigen noch sehr niedrigen Stückzahlen und unterschiedlichen Batterie-Typen eine große Anlagendiflexibilität erfordern. Die industrielle Herstellung einzelner Batterie-Typen auf speziellen Anlagen ist derzeit nicht wirtschaftlich. Die Modulmontage wird derzeit halb- bzw. vollautomatisiert durchgeführt, was vom Bekanntheitsgrad der Ausführung letztlich abhängig ist. Die Produktionsanlagen sollten dabei möglichst einfach umrüstbar und flexibel ausgelegt sein. Die eingesetzte Robotik in der Modultechnik stellt zwar eine Prozessflexibilität sicher, diese geht jedoch zu Lasten der Ausbringung. Bei der Batteriemontage wiederum sprechen zahlreiche Zurüüsteile derzeit gegen einen hohen Automatisierungsgrad (Schurer, 2011).

Als wesentliche Technologien/Prozesse in der Modul- und Batteriesystem-Montage können Reinigungsvorgänge (**Plasmareinigen**), das **Kleben**, Dichten (Flächenauftrag, Dichtraupenauftrag), **Schweißen** (Buckelschweißen, Ultraschallschweißen, Laserschweißen), **Schrauben** sowie die zahlreichen Prüf- und Testverfahren (Eingangstests, Spannung, Innenwiderstand, End of Line Tests, Laden, Zyklisieren, Flashen, Dichtigkeitstests) genannt werden (Schurer, 2011).

Nachfolgend werden die Prozessketten der **Zellstack-Erstellung**, der **Batteriemodul-Montage** sowie die der **Batteriesystem-Montage** hinsichtlich der derzeit eingesetzten und zukünftig möglichen Produktionstechnologien näher betrachtet.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die zur Herstellung des Batteriesystems erforderlichen Prozessschritte.

Produktionsprozesse von
Komponenten konventioneller
und neuer Antriebsstränge

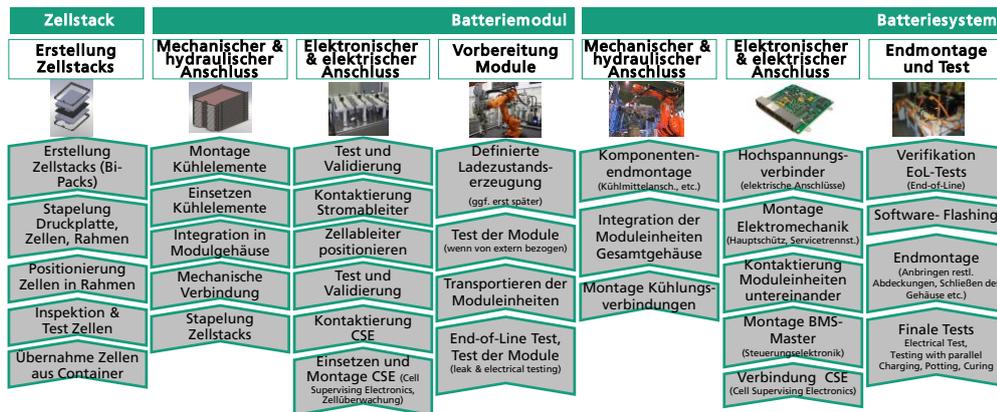


Abbildung 31: Erforderliche Prozessschritte bei der Herstellung des Batteriesystems (Grafik: Fraunhofer IAO)

4.5.2.2 Erstellung der Zellstacks

In einem ersten Schritt werden die angelieferten Zellen aus dem Container entnommen und einer Inspektion unterzogen. Werden die Anforderungen an die Batteriezelle erfüllt, dann folgt anschließend die Positionierung der Zellen in den Zellrahmen. Dieser besteht in der Regel aus Aluminium und kann auch als Kühlelement dienen. Hierbei ist eine exakte Positionierung der Zelle in den Rahmen ausschlaggebend für das anschließende Fügen der Zelle mit dem Rahmen. Der **Fügeprozess** kann beispielsweise durch den Einsatz eines thermisch leitenden und elektrisch isolierenden Kunstharzes vorgenommen werden (Vollmer, 2010). Die hierfür erforderlichen Prozessabläufe sind automatisiert und es werden spezielle High-Speed-Anlagen eingesetzt (Busch, 2011). Der im Forschungsvorhaben ELAB zugrunde liegende Zellstack ist ein Bi-Stack, welcher letztlich aus zwei Batteriezellen besteht. Bei neueren Rahmenkonzepten bestehen Bestrebungen, durch spezielle Dichtungs- und Fixierelemente eine optimale Verbindung zwischen Rahmen und Zelle zu erzeugen. Ein relativ starrer Rahmen wird mit einer elastischen Dichtung versehen, welche zugleich die Zelle fixiert und schützt. Durch diesen Aufbau lassen sich zudem Kanäle zum thermischen Management in den Rahmen integrieren (Beheizung oder Kühlung). Auch aus Sicht von produktionslogistischen Aspekten bietet diese Ausführung zudem Vorteile, da sie als eine Art Transporthilfe innerhalb der Fertigung dienen kann (Kritzer & Nahrwold, 2011). Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines Bi-Packs sowie eine mögliche Ausführungsform des Zellrahmens.

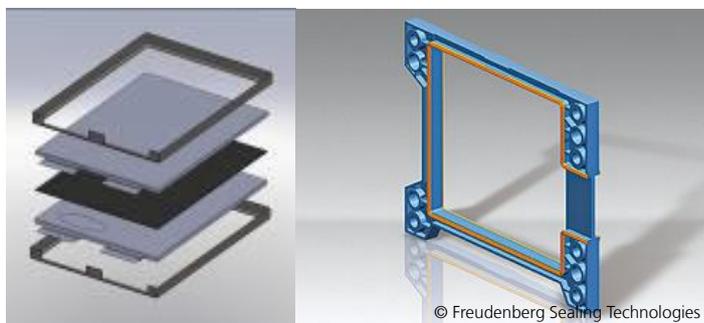


Abbildung 32: Aufbau eines Bi-Packs (links) und Ausführungsform eines Rahmenkonzepts (rechts) (Busch, 2011), (Kritzer & Nahrwold, 2011)

4.5.2.3 Batteriemodul-Herstellung

Nach dem Fügen der Zellen in den Rahmen erfolgt die Stapelung der Zellrahmen mit den fixierten Zellen wodurch aus den Bi-Packs letztlich ein sogenannter Zellstack entsteht (siehe Abbildung 33). Dieser Vorgang wird durch den Einsatz von **vollautomatisierten Montageanlagen** oder **Industrierobotern** realisiert (Busch, 2011). Die mechanische Verbindung zwischen den einzelnen Einheiten kann durch formschlüssige Verfahren erreicht werden. Nach der anschließenden Integration in das Modulgehäuse werden die Kühlelemente eingesetzt und montiert. Je nach Ausführungsform des Batterietyps können sich hierbei die Konzepte unterscheiden.

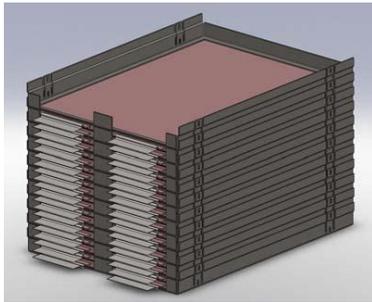


Abbildung 33: Schematische Darstellung eines Zellstacks (Busch, 2011)

Nachfolgend werden die elektronischen und elektrischen Anschlüsse installiert. Zunächst erfolgt die Integration und Montage der Zellüberwachungseinheit der sogenannten Cell Supervising Electronics (CSE). Bei einer modularen Anordnung des Batteriemangement-Systems findet dieser Vorgang unter manuellem Einsatz des Werkers statt. Als wesentlicher Grund ist hier die Forderung nach einem schonenden und positionsgenauen Einbau. Beschädigungen durch den Einsatz von Greifern im Zuge einer Roboterautomatisierung sollen so vermieden werden (Ecolean, 2010)

Je nach Art der Kontaktierung (elektrische als auch mechanische Kontaktierung) werden unterschiedliche Technologien eingesetzt. Die mechanische Verbindung zu den Zellstacks erfolgt mittels **Verschraubung** oder **Laserschweißen**. Die elektrische Kontaktierung kann durch ein **Lötverfahren** erfolgen. Hierbei ist darauf zu achten, dass zum einen eine dauerhafte Verbindung erzeugt und dass beim Schweiß- und Lötprozess keine Beschädigung auf Grund unkontrollierten Wärmeeintrags am Bauteil (wärmeempfindliche Platine) stattfindet. Nach der Kontaktierung der Einheit erfolgen der Test und die Validierung der Funktionsfähigkeit. An den Prozessschritt schließt sich die Positionierung der Zelleiter sowie die Kontaktierung der Stromableiter an. Die Kontaktierung kann hierbei als kritischer Prozessschritt gesehen werden, da die elektrische Kontaktierung der Zelleiter ausschlaggebend für die Funktionsfähigkeit der Batterie ist. Generell lassen sich zur Kontaktierung der Stromschiene verschiedene automatisierte Fügeverfahren, wie beispielsweise **Verschraubung, Nieten, Klemmen, Kleben, Laser- oder Ultraschallschweißen** einsetzen. Jedes Verfahren verfügt hierbei über unterschiedliche Eigenschaften, die spezifische Vor- und Nachteile eines Einsatzes mit sich bringen. Bei Schraub- und Nietprozessen beispielsweise erhöht sich der Montageaufwand, während Schweißprozesse bedingt durch die thermischen Einflüsse Beschädigungen hervorrufen können. Der Einsatz der Klebtechnik wiederum kann isolierend wirken (Busch, 2011), (Schiehlen & Steinbach, 2010). Um eine dauerhafte Sicherheit des Kontakts und niedrigen Kontaktwiderstand zwischen den Zellen zu ermöglichen, wird oftmals eine stoffschlüssige Verbindung gewählt. Hierbei ist ein Verfahren mit hoher Eignung zur Kontaktierung dünner Bleche bei schneller Taktzeit gefordert, um den Wärmeeintrag während der Verbindung zu begrenzen. Insbesondere das **Ultraschall-** aber auch bei höheren Stückzahlen das **Laserschweißen** können hierbei,

gegenüber herkömmlichen Verfahren wie Schrauben oder Aufschrupfen (oder den meisten formschlüssigen Verfahren), auf Grund der hohen Sicherheitsanforderungen, Vorteile bieten. Dies setzt auch eine genaue Positionierung und Fixierung der Zellen voraus. Aufgrund erhöhter Vibrationen im Fahrzeug werden die Schweißnähte zudem dynamisch belastet, was eine hohe mechanische Festigkeit der Verschweißung erfordert (Bonnekessel, 2011). Kritikpunkte sind hier aber ebenfalls die Sicherheit in der Produktion und Problematiken mit dem Wärmeeintrag an ungeeigneten Stellen bzw. ein unterschiedliches thermisches Verhalten der Werkstoffpartner. Weitere Herausforderungen stellen die anschließenden Prozessschritte bis zur Modulintegration unter dem Aspekt einer Prozessautomatisierung dar. Die (teilweise-) geladenen Zellen erfordern aus Sicherheitsgründen (Hochvoltanwendung) eine Integration vollautomatischer Automatisierungstechnik.

Nachfolgend findet eine derzeit meist manuelle oder teilautomatisierte Überprüfung der Batteriemodule statt (Ecolean, 2010). Zukünftig scheint jedoch die Etablierung eines vollautomatischen Prüfprozesses als wahrscheinlich (Schulze, 2011).

4.5.2.4 Batteriesystem-Montage

Die Herstellung des Batterie-Gehäuses kann indirekt als erster Schritt innerhalb der Batteriesystem-Montage verstanden werden. Dabei ist anzumerken, dass dieser Vorgang physisch von den Prozessschritten der Systemmontage getrennt sein kann (ausgegliederte Herstellung). In der Regel werden derzeit Metallwerkstoffe wie Stahl oder Aluminium eingesetzt, welche dann mittels umformenden Verfahren wie dem **Tiefziehen** verarbeitet werden. Aus Sicht des Anlagenequipments werden kraftgebundene Pressen benötigt, die hohe Investitionen erfordern. Als Herausforderung kann die erforderliche hohe Maßgenauigkeit gesehen werden. Der Forderung nach einem möglichst leichten Gehäuse stehen Anforderungen hinsichtlich Crash und Schadensbegrenzung bei Fehlfunktionen oder bei Auftreten eines Brandes entgegen. Auch die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) oder an die Dichtigkeit hinsichtlich thermischer und mechanischer Einflüsse müssen erfüllt werden. Zukünftig gilt es zu prüfen, welche neuen Werkstoffe die sehr hohen Anforderungen an diese Komponente erfüllen und alternativ für das Batteriegehäuse eingesetzt werden können. Der Einsatz von modernen (Polymer)Kunststoffen aber auch der von speziellen Magnesiumlegierungen erscheint hierbei denkbar (Allgaier, 2012).

Mit der Installation der mechanischen und hydraulischen Anschlüsse beginnt die eigentliche Prozesskette der Batteriesystem-Montage. Hierbei erfolgen zunächst die Montage der Kühlungsverbindungen sowie die daran anschließende Integration der Moduleinheiten in das Batteriegehäuse. Das Einsetzen der vormontierten Zellmodule in das Gehäuse kann, wie in Abbildung 34 dargestellt, manuell oder durch geeignete **Positionsroboter** mit entsprechender Greifeinheit erfolgen. Als zentrale Herausforderung dieses Prozesses kann die punktgenaue Positionierung der teils schweren und sperrigen Zellmodule gesehen werden (Schmid, 2010), (Busch, 2011), (Ecolean, 2010).



Abbildung 34: Manuelles und automatisiertes Einsetzen der Zellmodule (Busch, 2011), (Schmid, 2010)

Abschließend findet die Komponentenendmontage statt, bei der beispielsweise die Kühlmittelanschlüsse montiert werden. Die Kühlkreisläufe und –Elemente können sich hierbei, je nach Kühlvariante, unterscheiden.

Sind diese Prozessschritte abgeschlossen, so werden die elektronischen und elektrischen Anschlüsse installiert. Diese umfassen die Verbindung der Zellüberwachungseinheiten, die Montage der Hauptplatine des Batteriemanagementsystems (sogenannter BMS-Master (Steuerungselektronik)) und die Kontaktierung der Moduleinheiten untereinander. Durch Kontaktschienen (analog der Kontaktierung der Batteriezellen) werden die Moduleinheiten elektrisch miteinander verschaltet. Hierzu werden **automatisierte Schraub-** oder **Schweißprozesse** eingesetzt (Schmid, 2010), (Busch, 2011). Die anschließende Verschraubung der Zellmodule mit dem Gehäuse erfolgt auf Grund der sehr engen Raumverhältnisse durch den Werker in manueller Form. Abhilfe könnte hier zukünftig die Integration von **Vertikalknickarmrobotern** in diesen anspruchsvollen Prozessschritt schaffen.

Ebenfalls im Prozessschritt „Montage Elektromechanik“ wird der Hauptschütz sowie eine Servicetrennstelle integriert. Auch ein Hochspannungsverbinder für den Anschluss an die Antriebseinheit und den Anschluss zur Bordelektronik muss installiert werden. Diese aufwändigen Vorgänge werden derzeit vornehmlich **manuell** durchgeführt. Der Einsatz von Automatisierungstechniken findet somit keine Anwendung.

Daran anschließend erfolgen erstmals finale Tests in Form von elektrischen Prüfungen und Dichtigkeitsprüfungen (in der Regel Schnüfflerprüf- oder Druckluftprüfanlagen). Gerade bei der Dichtigkeitsprüfung stellt die Reduzierung der Prozesszeiten eine Herausforderung dar. Daran schließt sich die Endmontage des Systems an. Hierbei werden die restlichen Abdeckungen des Batteriegehäuses angebracht. Hierfür lassen sich mehrere Methoden einsetzen. Durch Auftragen einer **Nahtdichtung** und anschließendem **Verschrauben** der Batteriehaube kann die erforderliche Dichtigkeit erreicht werden. Weitere Möglichkeiten stellen das **Verschweißen** des Deckels oder der Einsatz der **Klebertechnik** dar. Nachteilig ist bei letzteren, dass ein zerstörungsfreies Öffnen nicht ohne weiteres möglich ist. Einsatzmöglichkeiten von automatisierten Lösungen bieten das Auftragen des Dichtmaterials beim Schrauben, beim Kleben oder beim Schweißprozess (Schmid, 2010), (Busch, 2011). Abbildung 35 zeigt eine automatisierte Dichtungsapplikation und Schweißprozesse bei der Batteriedeckelmontage.



Abbildung 35: Automatisierte Dichtungsapplikation und Schweißprozesse bei der Batteriedeckelmontage (Busch, 2011), (Keller, Birke, Schiemann, & Möhrstädt, 2009)

Der letzte Schritt auf dem Weg zum funktionsfähigen Batteriesystem stellt die End-of-Line Prüfung dar. Diese kann entweder manuell mit prozessoptimierten Prüfständen oder halbautomatisch durchgeführt werden. Parameter und Kennwerte, welche zur Charakterisierung des Batteriesystems dienen, werden in diesem abschließenden Test überprüft mit dem Ziel eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit des Systems zu gewährleisten (Keller, Birke, Schiemann, & Möhrstädt, 2009). Hierunter fallen beispielsweise Maße, Gewicht, Spannung, Stromstärken, Kapazität, Ladezustand und Temperatur an der Gehäuseoberfläche (IEC, 2010), (Fleischer, 2011). Auf mittel- bis langfristige Sicht ist hier mit einer vollständigen Prozessautomatisierung dieser Finaltests zu rechnen (Schulze, 2011).

4.6 Leistungselektronik

4.6.1 Produkttypologie

Neben dem Traktionsmotor und dem Batteriesystem stellt die Leistungselektronik eine weitere Schlüsseltechnologie im elektrifizierten Antriebsstrang dar (Strehlitz, 2012). Sie beeinflusst maßgeblich die Wirtschaftlichkeit und die Effizienz von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Übergeordnete Aufgabe der Leistungselektronik ist es hierbei den Energiefluss im Fahrzeug zu steuern und diesen an die unterschiedlichen Anforderungen beim Betrieb anzupassen. Hierzu gehört beispielsweise das Konvertieren der Spannung auf ein anderes Niveau (Herauf- oder Heruntersetzen einer Spannung) oder das Umrichten der Spannung (von Wechsel- auf Gleichspannung oder umgekehrt) oder eine Kombination aus beiden. Weiterhin müssen auch der Vorgang der Energierückgewinnung (Rekuperation) oder der Ladevorgang und die Spannungswandlung innerhalb des Bordnetzes über Komponenten der Leistungselektronik erfolgen (Spath, et al., 2011). Die derzeit bei automobilen elektrischen Antrieben favorisierte permanenterrregte Synchronmaschine weist hierbei allerdings gegenüber den bereits weit verbreiteten Industrieantrieben ein deutlich anderes Verhalten auf (nicht lineares Reluktanzdrehmoment, starke magnetische Sättigung, sehr großer Konstant-Leistungs-Bereich) (Böcker, Huber, Meyer, Peters, Pohlenz, & Specht, 2010). Um diese sehr hohen Anforderungen im automobilen Bereich zu erfüllen, muss eine optimale an das Fahrzeug angepasste Leistungselektronik konzipiert werden. Nachfolgende Abbildung zeigt eine mögliche Ausgestaltungsform einer im Elektrofahrzeug integrierten Leistungselektronik.

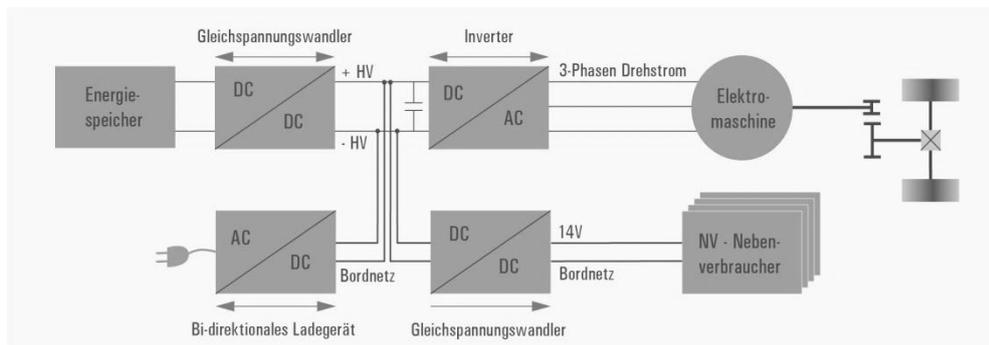


Abbildung 36: Mögliche Topologie Leistungselektronik mit HV-Batterie und NV-Bordnetz (Grafik: Fraunhofer IAO, in Anlehnung an (Hofmann P. , 2010)

Belastungen des Materials in Form von thermo-mechanischen Spannungen, welche beispielsweise bei Änderungen der Drehmomentanforderungen erfolgen, können als eine der größten Herausforderungen bei der Leistungselektronik angesehen werden. Diese Umstände führen dazu, dass mit relativ niedrigen Temperaturhüben gearbeitet werden muss und in Folge dessen nicht das gesamte Leistungspotential der Halbleiterbauelemente (Silizium) ausgeschöpft werden kann. Schädlich sind insbesondere hohe aktive und passive Temperaturhübe, die es zu vermeiden gilt. Diese Problematik spiegelt sich direkt in den Herstellungskosten der Leistungselektronik-Komponenten wieder, da die Kosten für die Leistungshalbleiter von der benötigten Siliziumfläche abhängig sind.

Weitere wichtige Aspekte in der Entwicklung und Auslegung der Leistungselektronik stellen die Verbesserung des Wirkungsgrads sowie die Reduzierung des erforderlichen Bauraums der Leistungselektronik, sowie die Reduzierung der Kosten dar. Vor allem in Hybridfahrzeugen werden hohe Anforderungen an das Packaging der Komponenten gestellt, da durch die Integration und Kombination zweier Antriebskonzepte der

zur Verfügung stehende Bauraum deutlich kleiner als bei anderen Antrieben ausfällt (Strehlitz, 2012).

Im Folgenden werden die Komponente des Pulswechselrichters sowie die des Gleichspannungswandlers näher beschrieben, da diese im Zusammenhang mit der Leistungselektronik im Zentrum der Betrachtung des Forschungsvorhabens ELAB stehen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die erforderlichen Aufgaben der beiden Komponenten in einem System integrierbar sind, nachfolgend mit Leistungselektronik-System bezeichnet. Derzeitige Produktgenerationen, welche sich bereits wie bei dem Unternehmen Continental in der Serienfertigung befinden, vereinen diese beiden Einheiten zu einem Leistungselektronik-System (Weber, 2011)

Pulswechselrichter

Der Pulswechselrichter oder auch Inverter genannt hat die Aufgabe den aus der Batterie bereitgestellten Gleichstrom in einen für den Drehstromantrieb des Traktionsmotors benötigten Wechselstrom zu wandeln (oder umgekehrt beim Vorgang der Rekuperation) und diesen an die Erfordernisse der elektrischen Maschine anzupassen. Hierfür fungiert die Komponente des Pulswechselrichters als eine elektronische Stelleinrichtung. Die in Form von Gleichstrom von der Batterie bereitgestellte Energie wird in eine mehrphasige Wechselfspannung umgewandelt, da die Ansteuerung des Traktionsmotors eine variable Wechselfspannung in einer variablen Frequenz zur Drehzahlstellung erfordert (Spath, et al., 2011). Der funktionale Aufbau des Pulswechselrichters setzt sich, wie in Abbildung 37 ersichtlich, aus verschiedenen Bestandteilen zusammen. Als wesentliche Elemente sind hier das Leistungsmodul, die Steuerungselektronik sowie die Zwischenkreiskondensatoren und das Gehäuse zu nennen.

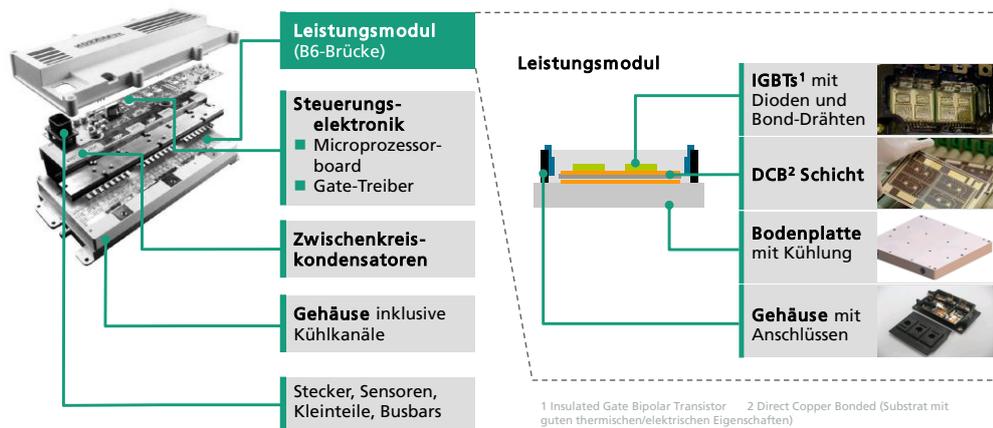


Abbildung 37: Pulswechselrichter und seine wesentlichen Bestandteile (Grafik: Fraunhofer IAO)¹

Das Leistungsmodul besteht aus zahlreichen Hochleistungs-Halbleiterschaltungen, wie beispielsweise IGBTs oder MOSFETs (Spath, et al., 2011).² Die in der Regel eingesetzte Schaltungs-Topologie stellt hierbei die B6-Brückenschaltung mit 6 Leistungsschaltern dar. Die für die Steuerung des Inverters erforderliche Steuerungselektronik umfasst ein Microprozessorboard sowie einen Gate-Treiber. Weiterhin wird zur Glättung der

¹ Bildmaterial: SEMIKRON 2011

² IGBT steht hierbei für insulated-gate bipolar transistor (zu dt. Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode. Die Abkürzung MOSFET steht für metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (zu dt. Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)

Eingangsspannung ein Zwischenkreiskondensator benötigt, welcher in der Regel in Form eines Folienkondensators zum Einsatz kommt. Bedingt durch die hohen Spannungen und der erforderlichen Kapazität nimmt die Komponente des Kondensators einen bedeutenden Anteil am gesamten Platzbedarf ein und beeinflusst neben der Leistungsdichte auch maßgeblich die Zuverlässigkeit des Pulswechselrichters. Zusammen tragen die Komponenten des Leistungsmoduls und des Kondensators zu einem Großteil der Gesamtkosten des Inverters bei (Cebulski, 2011). Neben den beschriebenen Komponenten erfordert das Gesamtsystem zahlreiche Leistungsanschlüsse, Stecker und Sensoren sowie ein auf die Anforderungen der Leistungselektronik abgestimmtes Gehäusekonzept, welches beispielsweise integrierte Kühlkanäle aufweist.

Gleichspannungswandler

Anders als der Pulswechselrichter hat der Gleichspannungswandler (auch DC/DC-Wandler genannt) die Aufgabe aus einer variablen Eingangsspannung (Gleichspannung) eine veränderte Ausgangs-Gleichspannung zu erzeugen. Als wichtigstes Kriterium kann hierbei der Betrag und die Güte der verwendeten bzw. der zu erzeugenden Spannungen und Ströme gesehen werden (Cebulski, 2011). Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Komponenten, welche im Pulswechselrichter erforderlich sind, benötigt der Gleichspannungswandler Drosseln für die Induktivität (Garcia, 2002).

4.6.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

Hinsichtlich der Produktionsprozesse liegt der Fokus im Forschungsvorhaben ELAB auf den Bestandteilen des Leistungselektronik-Systems, welches als Schlüsselkomponente maßgeblich die Effizienz und Wirtschaftlichkeit des elektrisch angetriebenen Fahrzeugs mitbestimmt. Beim Aufbau einer für die Serienfertigung dieser Komponenten angemessenen Produktionsumgebung müssen zahlreiche Aspekte hinsichtlich automobiler Anforderungen erfüllt und beachtet werden. Hierunter fallen die Notwendigkeit neuer Produktionstechnologien wie das **Laser-** oder **Ultraschallschweißen** in Bezug auf Hochvolt-Anforderungen und dem erforderlichen kompakten Design der Komponenten. Weiterhin werden neue Sicherheitsanforderungen im Hochvoltbereich (Tests und Funktionsprüfungen unter Bedingungen >400V, Stromstärken >1200 Ampere) oder eine 100 prozentige Nachverfolgbarkeit in der Produktion erforderlich.

Auch die hohe geforderte Lebenserwartung der Komponenten im Einsatz (derzeit 8-10 Jahre) bei gleichzeitig kürzeren Produktlebenszyklen (derzeit ca. 4 Jahren) beeinflussen die Auslegung von Prozessen und die Auswahl von Anlagen. Ebenfalls stellt die Einführung einheitlicher Produktionsstandards für die Endmontage und die abschließenden Tests eine große Herausforderung für zukünftige Betriebe dar (Weber, 2011). Um die Qualität der LE-Einheiten sicherzustellen (für automobiler Großserienfertigung) besteht das Bestreben sämtliche Prozesse und Produktionstechnologien, welche einen direkten negativen Einfluss auf die Bauteilqualität haben zu eliminieren. Fertigungstechnologien wie das **Löten** oder herkömmliche **Bonding-Prozesse** begrenzen vielerorts die Ausnutzung neuer Halbleitertechnologien (z.B. Siliciumcarbid (SiC)), da hohe Temperaturen in der Fertigung nicht zulässig sind (Weber, 2011). Im Spannungsfeld zwischen immer höheren Einsatztemperaturen von Leistungselektronik-Bauelementen bei gleichzeitig höheren Anforderungen an die Lebensdauer zwischen Substrat und Die, müssen zukünftig weitere Prozessverbesserungen und -technologien erarbeitet werden. Nachfolgende Abbildung zeigt die betrachteten Komponenten und deren wesentlichen Prozessschritte in der Herstellung bis zur Endmontage des Leistungselektronik-Systems und die hierfür eingesetzten Produktionstechnologien.

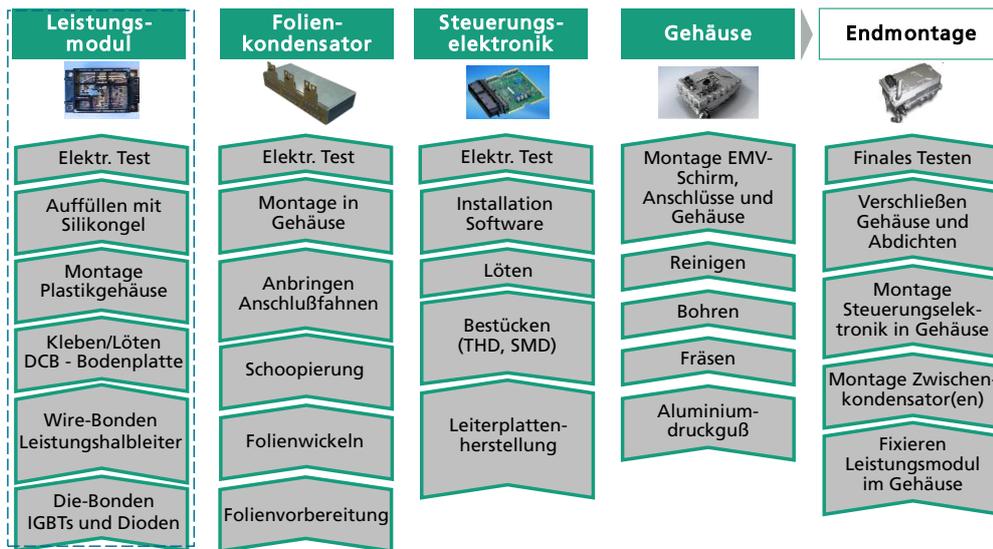


Abbildung 38: Übersicht über wesentliche Komponenten des Leistungselektronik-Systems und Auswahl eingesetzter Fertigungsverfahren –und technologien (Grafik: Fraunhofer IAO)

4.6.2.1 Herstellung des Leistungsmoduls

Die sehr aufwändige Komponente des **Leistungsmoduls** setzt sich im Wesentlichen aus den Hochleistungs-Halbleiterschaltungen, einer Bodenplatte, der DCB-Schicht sowie dem Gehäuse, welches in der Regel aus Kunststoff besteht, zusammen (siehe auch Abbildung 37). Die Auswahl eingesetzter Fertigungsverfahren erstreckt sich hierbei von Beschichtungsverfahren (chemisch, galvanisch), Materialabtragung durch Ätzen, spanenden Trennverfahren wie dem Sägen oder Fräsen, fügenden Verfahren wie Löten, Kleben oder (Ultraschall)Schweißen bis zu aufwändigen Montagetätigkeiten. Abbildung 39 zeigt in vereinfachter Form die für die Herstellung des Leistungsmoduls eingesetzten Fertigungsverfahren.

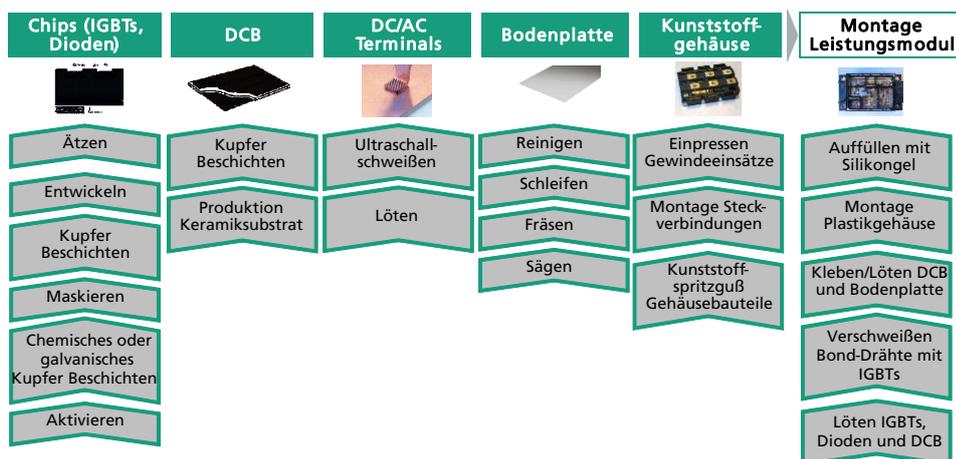


Abbildung 39: Komponenten des Leistungsmoduls und deren Herstellung in vereinfachter Form (Grafik: Fraunhofer IAO)

In der Montage des Leistungsmoduls werden die einzelnen Elemente zusammengeführt. Mittels des Chip-Bonden (auch Die-Bonden genannt), werden die einzelnen Chipelemente (IGBTs und Dioden) auf die Grundplatte fixiert. Weitere Aufbautechniken können hier **Klemmen**, **Verschrauben** oder die **Sintertechnologie** darstellen. Anschließend werden die Leistungshalbleiter-Elemente mit dem Draht-Bonden

(auch Wire-Bonden genannt) mit elektrischen Anschlüssen an das Chipgehäuse verbunden. Herkömmliche Aluminium Bond Verbindungen bergen große Nachteile hinsichtlich der Spannungskapazität und Zuverlässigkeit (ein Ausfall der Bonds unter thermomechanischen Belastungen ist nicht unüblich), da neue Generationen von Hochleistungs-Halbleiterschaltungen wie IGBTs und MOSFETS sehr hohe Energiedichten erreichen (Steger, 2011).

Anschließend erfolgt das Fügen des DCB-Substrats mit der Bodenplatte sowie die Montage des Kunststoffgehäuses. Mittels Silikongel wird dann der Innenraum des Gehäuses aufgefüllt bevor die elektrischen Tests durchgeführt werden.

Derzeitige Entwicklungen zielen auf die Substitution der Lötverbindungen und der Wärmeleitpaste durch den Einsatz der **Sinter-Technologie**. Sinterschichten können dabei unter höheren Temperaturen eingesetzt werden, wie sie einige neue Halbleiter-Technologien (bspw. SiC) benötigen. Durch das Einbringen einer Sinterschicht zwischen DCB und der Wärmesenke können beispielsweise Vorteile wie eine gesteigerte thermische Leitfähigkeit oder eine verbesserte Chip-Kühlung und höhere Inverter-Spannungen erzielt werden (Steger, 2011). Auch der zukünftige Einsatz des **Laser-Schweißens** von Kupferverbindungen und dessen Einsatz in der automobilen Großserie wird derzeit erforscht (Ramsayer, Engler, & Schmitz, 2011). Ein weiterer Ansatz ist die Konzipierung neuartiger Gehäusekonzepte, um eine vereinfachte Bestückung mit Bauelementen zu erreichen. Leistungshalbleiterbauteile wie IGBTs werden oft nur als Through-Hole- Bauteile oder Module manuell bestückt, verlötet und mit einem Kühlkörper verschraubt. Durch neue Gehäuseausführungen sollen somit Bestückungsvorgänge vereinfacht werden und ein erhöhter Automatisierungsgrad in der Montage erreicht werden. Weiterhin können neuartige Gehäusekonzepte zu einer verbesserten Kühlung des Systems beitragen.

4.6.2.2 Herstellung des Folienkondensators

Da der Kondensator bei neueren Generationen der Leistungselektronik, bedingt durch die erforderlichen Leistungswerte und Anforderungen an die Zuverlässigkeit, eine wesentliche Komponente für den Betrieb des Systems darstellt, sollen im Folgenden die hierfür wesentlichen Produktionsprozesse aufgezeigt werden. Die Herstellung des Folienkondensators beginnt mit der Vorbereitung der Folien. Hierfür wird das Kunststoffmaterial durch einen **Extrudier-Vorgang** zu extrem dünnen Folien verarbeitet (ca 0.03 μm) (Olbrich, 2006). Daran anschließend werden in der Regel durch ein **Vakuumverfahren** die Folien mit Aluminium oder Zink metallisiert. Anschließend werden die dünnen Folien auf die Abmaße der späteren Kondensatorabmaße geschnitten und daran anschließend jeweils zwei geschnittene Folien leicht gegeneinander versetzt gewickelt. Beim **Schoopieren** wird eine elektrische Kontaktierung, in der Regel an den Stirnkanten der Wickel, durch das **Aufspritzen** oder **Aufsprayen** von geschmolzenem Metall (Zinn, Zink, Aluminium) hergestellt (Pfeiffer, Busch, Schlögl, Kochem, Dries, & Winter, 2000). Anschließend erfolgen die Anbringung der Anschlussfahnen mittels eines **Schweiß-** oder **Lötvorgangs** und die Montage in das Kondensatorgehäuse. Abschließend wird die Komponente einer elektrischen Endprüfung unterzogen, welche die Überprüfung spezifischer Kenngrößen wie die des Kapazitätswerts, des Verlustfaktors oder der Impedanz vornimmt.

4.6.2.3 Herstellung der Steuerungselektronik

Die Herstellung der Steuerungselektronik beginnt mit der Herstellung der Leiterplatten. Hierzu wird ein elektrisch isolierendes Trägermaterial als Basis gewählt. Bevor die **Bestückung** der Bauelemente auf der Leiterplatte erfolgt, wird ein elektrisches Kontaktmittel aufgetragen. Der Bestückung der Leiterplatten mit kleinen Bauelementen (SMD) schließt sich die Bestückung mit großen Bauelementen (THT) an.¹ Während in der Regel sehr kleine Bauteile (SMDs) vollautomatisiert bestückt werden (Pick & Place-Automaten) erfolgt die Montage der großen Bauteile teilweise noch manuell. Der Trend in der Auslegung von Leiterplatten geht dahin, elektronische Baugruppen direkt in die Leiterplatte zu integrieren und nicht wie derzeit darauf zu montieren. In dem vom BMBF geförderten Projekt „Hochstromleiterplatten als Integrationsplattform für Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen (HI-LEVEL)“ arbeiten derzeit mehrere Unternehmen und Forschungseinrichtungen an der Beforschung dieser Thematik (Laufzeit: 01.09.2011 - 31.08.2014) (Cluster Leistungselektronik, 2011).

Mittels des **Schwallbadverfahrens** wird anschließend eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den einzelnen Elementen hergestellt. Nach dem Aushärten und dem Trennen der einzelnen Platten werden die Leiterplatten einer künstlichen Alterung unterzogen, welche bedingt durch die Bauteilspezifikation gefordert wird. Erst im Anschluss daran kann die bestückte Leiterplatte geprüft und gekennzeichnet werden. Ist die Leiterplatte fertiggestellt, so erfolgt die Installation der Software sowie die abschließenden Tests, welche die Funktionsfähigkeit der Steuerelektronik überprüfen.

4.6.2.4 Gehäuseherstellung und Endmontage des Leistungselektronik-Systems

Das Gehäuse des Leistungselektronik-Systems besteht in der Regel aus Aluminiumdruckguß. In einem ersten Schritt wird hierfür der Boden aufgelegt und das eigentliche Gehäuse geformt. Weiterhin muss die Kühlstruktur ausgelegt und in das Gehäuse eingebracht werden. In der Herstellung des Gehäuses kommen neben dem **Druckgießen** weitere Fertigungsverfahren wie **Fräsen** oder **Bohren** oder notwendige Reinigungsvorgänge zum Einsatz. Anschließend werden die elektrischen Baugruppen in das geformte und bearbeitete Gehäuse eingebracht. Die abschließende Endmontage des Leistungselektronik-Systems beginnt mit der Fixierung des Leistungsmoduls im Gehäuse. Anschließend findet die Montage der Zwischenkondensatoren statt. Im nachfolgenden Prozessschritt wird die Einheit der Steuerungselektronik in das Gehäuse montiert und es kann die Programmierung des Systems erfolgen. Nachfolgend wird das Systemgehäuse verschlossen und abgedichtet. In einem finalen Schritt erfolgen dann die Tests hinsichtlich der Funktionsfähigkeit des Systems und die abschließende Kennzeichnung der Einheit.

¹ Die Abkürzung SMD steht hierbei für Surface Mount Device (zu dt. oberflächenmontiertes Bauteil). Die Abkürzung THT steht für Trough-hole Technologie (zu dt. Durchsteckmontage)

4.7 Brennstoffzellensystem und Wasserstoffdrucktank

4.7.1 Produkttypologie

Brennstoffzellen allgemein

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler. Sie wandeln die chemische Energie eines Brennstoffs kontinuierlich und direkt in elektrische Energie und thermische Energie (Wärmeverluste). Die Brennstoffzelle allgemein besitzt eine große Brennstoffvariabilität. Neben dem im Forschungsprojekt ELAB beschriebenen Wasserstoffbetrieb können auch Brennstoffe wie Erdgas, Methanol bis hin zu flüssigen Kraftstoffen eingesetzt werden (Wehrhahn, 2009, S. 17). Eine Brennstoffzelle in Verbindung mit einem Energieträger wie Wasserstoff bietet einige Vorteile, wie bspw. Verzicht auf das toxische Methanol oder keine Notwendigkeit für einen aufwendigen Reformier beim Methanol-Betrieb. Insbesondere für Elektrofahrzeuge, die auf Langstrecken zum Einsatz kommen oder bei einer generell geforderten hohen Reichweite von Elektrofahrzeugen, ist die Brennstoffzelle in Verbindung mit Wasserstoff auch eine interessante Alternative zu einer Batterie mit hoher Energiekapazität.

Seit Jahren wird intensive Forschung auf diesem Gebiet betrieben, wodurch bereits große Fortschritte erreicht werden konnten. Ein Großserienstart wurde aus verschiedenen Gründen bisher nicht realisiert. Dazu zählen neben technologischen Aspekten insbesondere infrastrukturelle und wirtschaftliche Gründe. Mehrere Hersteller führen bereits seit einigen Jahren Prototypen und Kleinserientests durch (bspw. Daimler, Honda, Opel etc.) und haben eine Serienproduktion für die Jahre 2014/15 angekündigt. Bis dahin soll auch der Ausbau der notwendigen Infrastruktur in Deutschland vorangetrieben werden. Hervorzuheben ist hierbei die Clean Energy Partnership (CEP). Fünfzehn Partner (BMW, Daimler, Ford, VW, Toyota, Linde, Shell, Statoil und weitere) erproben hier die Systemfähigkeit von Wasserstoff im täglichen Einsatz (Spath, et al., 2011, S. 29).

Proton Exchange Membran Brennstoffzellen

Man unterscheidet je nach verwendetem Elektrolyt und Arbeitstemperatur verschiedene Arten von Brennstoffzellen. Diese haben zum Teil sehr stark voneinander abweichende Eigenschaften. Eine Übersicht zu diesen findet sich in der Fachliteratur, beispielsweise in (Wehrhahn, 2009, S. 18) oder (Jörissen & Garche, 2000, S. 17). Der Fokus des Forschungsprojektes liegt auf der PEM Brennstoffzelle (Proton Exchange Membran) mit Wasserstoff und Hochdruck-Wasserstofftanks.

Die PEM-Brennstoffzelle wird meist im Niedertemperaturbetrieb von 50 bis 80 °C betrieben. Ein Hochtemperaturbetrieb kann bis etwa 120-160°C erfolgen. Um eine starke Materialbeanspruchung zu vermeiden, wird das System meistens unter 90 °C betrieben (emc-eu1, 2012). Die niedrige Arbeitstemperatur wird als entscheidender Vorteil der PEM-Brennstoffzelle für den mobilen Einsatz gesehen (Kern, 2008), (Wallentowitz & Reif, 2011, S. 98). Die Leistungsdichte liegt mit 0,5 bis 1,0 W/cm² um den Faktor 3 bis 5 höher als bei anderen Brennstoffzellentypen (emc-eu1, 2012). Weitere Vorteile sind ein Wirkungsgrad von 40-60%, schnelle Betriebsbereitschaft sowie hohe Dynamik und Ansprechverhalten in der Leistungsabgabe.

Aufbau einer Zelle und Funktionsweise

Das PEM Brennstoffzellen-System wird mit Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) in Form von Luft gespeist. Die Gase gelangen durch Zuleitungen unter leichtem Druck zur Brennstoffzelle oder zu dem aus mehreren Zellen aufgebauten Zellenstapel. Werden die beiden Elektroden über eine Last miteinander verbunden so kann ein elektrischer Strom fließen, so lange die Versorgung der Elektroden mit Wasserstoff und Sauerstoff gewährleistet ist. Der Stromfluss wird direkt durch die Wandlung der

chemischen Energie (von H_2 und O_2) in elektrische Energie und H_2O ermöglicht (Jörissen & Garche, 2000, S. 15-16).

Produktionsprozesse von
Komponenten konventioneller
und neuer Antriebsstränge

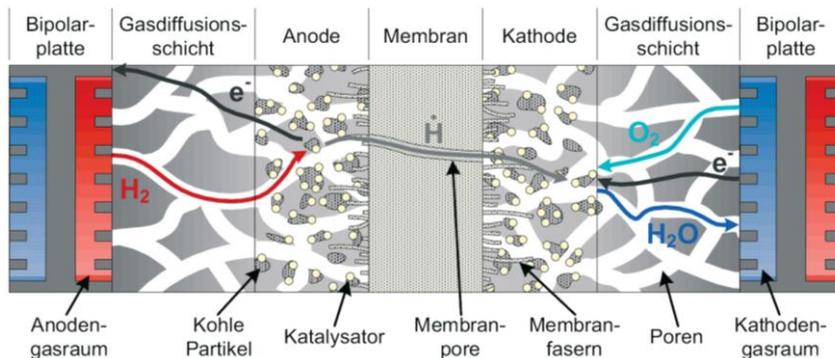


Abbildung 40: Aufbau Brennstoffzelle (Wehrhahn, 2009, S. 18)

Der Elektrolyt besteht hier aus einer ionenleitenden Kunststoffolie (Membran). Die Membran leitet die an den Elektroden (unterteilt in Anode und Kathode) entstehenden Ionen und trennt die Anoden- und Kathodengasräume voneinander, um eine unkontrollierte Knallgasreaktion zu vermeiden. Für Gase ist die Membran undurchlässig (emc-eu1, 2012). Die Einheit aus Membran, Elektroden und Gasdiffusionsschicht wird MEA (Membran Electrode Assembly) genannt.

An der Grenzfläche der Elektroden zur Membran laufen die elektrochemischen Reaktionen ab. Der Katalysator bewirkt eine Beschleunigung der Reaktion der aktiven Schicht. Die konventionelle Katalysatorschicht besteht aus Kohlenstoffpartikeln, die mit einem Katalysator (feinstverteiltes Platinpulver $-0,5g/m^2$) durchsetzt sind (BzA-BW & WRS, 2009, S. 19). Grundsätzlich besteht sowohl die Möglichkeit den Katalysator auf die Gasdiffusionsschicht (wie abgebildet) oder auch auf die Membran aufzubringen.

Die poröse und partiell hydrophobierte Gasdiffusionsschicht verteilt die Fluide gleichmäßig über die gesamte Fläche, sorgt für den Abtransport des Produktwassers, leitet Elektronen von der Anode über die Bipolarplatte zur Kathode und bildet ein Äquipotential über der Fläche (Wehrhahn, 2009, S. 30). Die Gasdiffusionsschicht kann zur optimierten Verteilung auch zweilagig (nicht abgebildet) aufgebaut sein. Hierfür eignet sich eine makroporöse Schicht (hin zur Bipolar-Platte) sowie eine PTFE beschichtete mikroporöse Schicht (hin zur Membran).

Die Bipolarplatte leitet die Elektronen zur nächsten Zelle, trennt die Gasräume benachbarter Zellen und versorgt über Kanalstrukturen die Elektroden mit den Reaktanden Wasserstoff und Sauerstoff (Wehrhahn, 2009, S. 17). Der Gesamtaufbau ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Aufbau Brennstoffzellen-Stack

Ein Brennstoffzellen-Stack besteht aus einer Vielzahl an Komponenten, wie der MEA (Membran Electrode Assembly, bestehend aus Membran, Katalysatorschicht, Elektrode sowie Gasdiffusionsschicht, Bipolarplatten, Dichtungen und Endplatten. Einen möglichen Aufbau zeigt nachfolgende Abbildung. Die benötigten Stromkollektoren können direkt in die Endplatten integriert sein, ebenso die Zu- und Ableitungen der Medien.

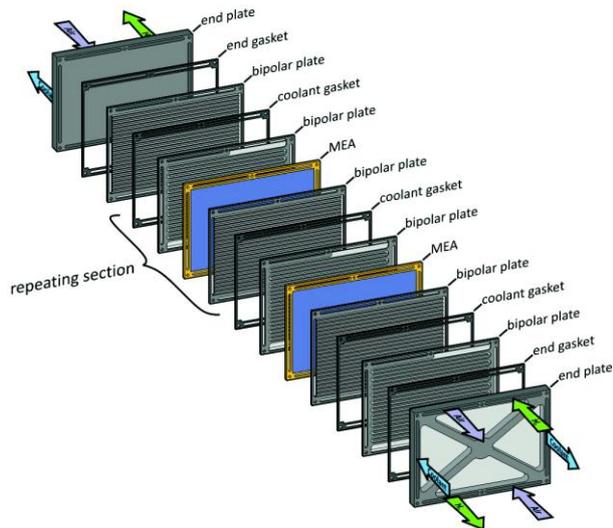


Abbildung 41: Aufbau Brennstoffzellen-Stack (Strukturmodell) (James, Kalinoski, & Baum, 2010)

Aufbau Brennstoffzellen-System

Um eine entsprechende Ausgangsleistung zu bekommen, können mehrere Brennstoffzellenstapel (Brennstoffzellen-Stacks) parallel und seriell in Verbund geschaltet werden. Des Weiteren sind verschiedene Peripherieaggregate je nach Brennstoffzellentyp, Brennstoff und Betriebsweise nötig. Nachfolgende Abbildung zeigt einen beispielhaften Systemaufbau des Brennstoffzellen-Systems. Hierbei sind ebenfalls die unterschiedlichen Kreisläufe der Medien (Wasserstoff, Luft und Kühlmittel) sowie der jeweiligen Komponenten visualisiert. Anzumerken bleibt, dass die Brennstoffzellentechnologie sich noch in der Entwicklung befindet und eine Verringerung der Komplexität und Anzahl an benötigten Komponenten angestrebt wird. Beispielsweise wird daran gearbeitet auf einen Membranbefeuchter oder einen Niedrigtemperatur-Kühlkreislauf verzichten zu können. Da ein Durchbruch in diesen Entwicklungen noch nicht abzusehen ist, geht das Forschungsprojekt von einem Aufbau eines Brennstoffzellensystems wie abgebildet aus.

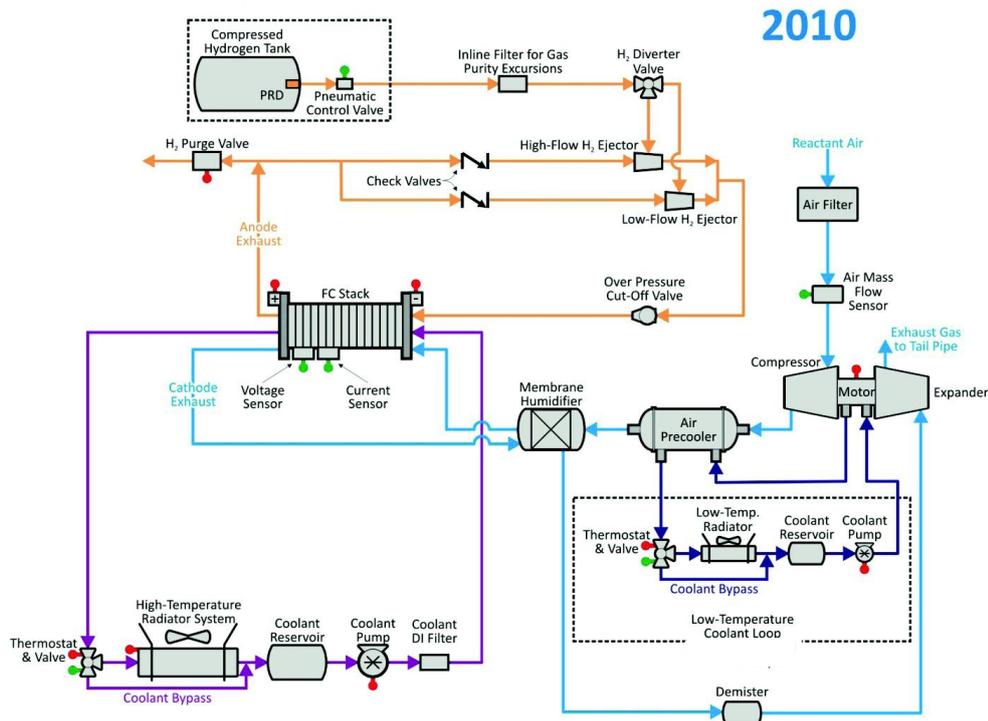


Abbildung 42: Visualisierung Gesamtaufbau Brennstoffzellen-System (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 10)

Nachfolgende Tabelle zeigt in einer Übersicht die wichtigsten Komponenten des PEM Brennstoffzellen-Systems im Wasserstoffbetrieb nach heutigem Stand der Technik. Die Darstellung zeigt die im Forschungsprojekt fokussierten Komponenten.

Brennstoffzellen-System		Subkomponenten		
Brennstoffzellen-Stack	MEA (Membran Electrode Assembly)	Membran (PTFE)	Katalysatorschicht	Gasdiffusionsschicht
	Bipolar-Platten			
	Dichtungen			
	Balance of Stack	Endplatte / Stromkollektor	Zuganker / Druckband	Rahmen / Gehäuse
H₂-Drucktank	Druckbehälter/Liner			
	Sonstiges	Druckminderer	Leitungen	Kupplungen
Balance of Plant	Brennstoffmanagement	Rezirkulationsgebläse	Rezirkulationspumpe	Wasserstoff-Ejektor
	Wassermanagement	Membran-Befeuchter	Wärmetauscher	Wasserabscheider
	Luftmanagement	Kompressor-Expander	Luftvorkühler	Luftfilter
	Wärmemanagement	Kühler	Lüfter	Pumpe
	Elektronik	Steuerung / Leittechnik	Zellspannungsüberwachung	Sensorik / Verkabelung
Sonstiges	Rahmen / Gehäuse	Schläuche / Rohre	Sensoren	

Tabelle 6: Übersicht Komponenten Brennstoffzellen-System

4.7.2 Prozessketten und Produktionsverfahren/-technologien

Die Prozesskette für die Herstellung eines Brennstoffzellen-Systems lässt sich grob aufgliedern in die Herstellung des Brennstoffzellen-Stacks, die Herstellung weiterer Komponenten des Brennstoffzellen-Systems, sowie die Montage des Gesamtsystems. Brennstoffzellen sind heute schon in einigen Spezialanwendungen im Einsatz. Eine automobiler Großserienproduktion wurde hingegen noch nicht umgesetzt. Zahlreiche Unternehmen arbeiten aktuell an einer Verwirklichung dessen. Aufgrund der fehlenden Erfahrung ist es allerdings möglich, dass es bei Komponentenlieferanten zu Schwierigkeiten bei der (kontinuierlichen) Gewährleistung ausreichender Qualität für die automobiler Großserie kommen kann. Automobilbauer, welche bisher meist als Systemintegrator aufgetreten sind, erarbeiten sich aktuell ebenfalls notwendiges Know-how für die Eigenfertigung von Komponenten sowie deren Produktionsprozesse. Dies geschieht teilweise auch in Kooperationen, wie sich am Beispiel der Automotive Fuel Cell Cooperation, ein Zusammenschluss von Daimler, Ford, Ballard und NuCellSys zeigt.

Der Brennstoffzellen-Stack wird als das wichtigste Element eines Brennstoffzellen-Systems angesehen und ist auch in den meisten Fällen für den Großteil der Kosten verantwortlich (Wehrhahn, 2009, S. 18). Zu den Komponenten zählen hierbei die MEA (bestehend aus Membran, Elektrode mit Katalysator sowie GDL), die Bipolar-Platten, die Dichtungen sowie sonstigen Komponenten (Balance of Stack). Obwohl der Stack heutzutage noch vielfach von den Automobilbauern komplett zugekauft wird, nimmt ELAB in der Zukunft, aufgrund der Wichtigkeit der Komponente, einen hohen Anteil eigener Fertigung dieser Komponenten beim OEM an und berücksichtigt die Auswirkungen entsprechend quantitativ. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die zur Herstellung des Brennstoffzellen-Stacks erforderlichen Produktionsschritte und grundlegenden Komponenten. Ebenfalls ist hier die Montage des Stacks sowie die des Gesamtsystems dargestellt.

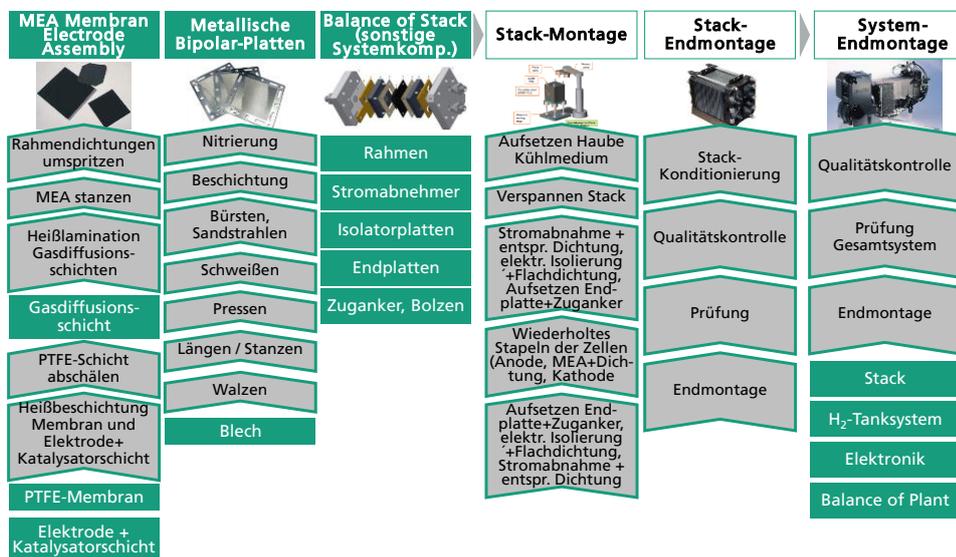


Abbildung 43: Erforderliche Prozessschritte und Komponenten bei der Herstellung des Brennstoffzellen-Stacks sowie Brennstoffzellen-System (Grafik: Fraunhofer IAO)

Eine detaillierte Betrachtung der Komponenten erfolgt im anschließenden Unterkapitel. Als wesentliche Technologien in der Fertigung sind zu nennen: Für die MEA: Folienherstellung, Beschichten, Heißpressen, Beschneiden sowie Siebdruck, Mahlen (Mahlwerke, Kugelmühlen), Mischen, Rühren. Bei den metallischen Bipolar-Platten: Stanzen, Pressen, Prägen, Laserschweißen, Bürsten, Sandstrahlen,

Beschichten. Bei graphitischen Bipolar-Platten: Mahlen, Rühren, Spritzgießen, Imprägnieren, Heißpressen, Scheren. Sonstige Stack- und System-Komponenten: Gießen, Walzen, Tiefziehen, Scherschneiden, Bohren, Fräsen, Strahlspanen, chemisches Reinigen, Schichten / Aufsetzen, Schrauben, Kleben, Lackieren, chemisches Beschichten. Des Weiteren sind manuelle und automatisierte Montagetätigkeiten sowie Prüfungen notwendig. (Demuß, 2000, S. 156), (BzA-BW & WRS, 2009, S. 16ff).

Neben dem Stack besitzt auch der Wasserstoff-Tank eine hohe Relevanz für das gesamte System, insbesondere bezüglich dessen hoher Qualitätsanforderung bei einer Großserienfertigung und einer Belastung bis 700 bar. Auch hier wird eine Eigenfertigung angenommen. Eine detaillierte Beschreibung der Herstellprozesskette findet sich im anschließenden Unterkapitel. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die notwendigen Herstellprozesse des Hochdrucktanks sowie weiterer Komponenten des Brennstoffzellen-Systems wie Membranbefeuchter oder Kühler.

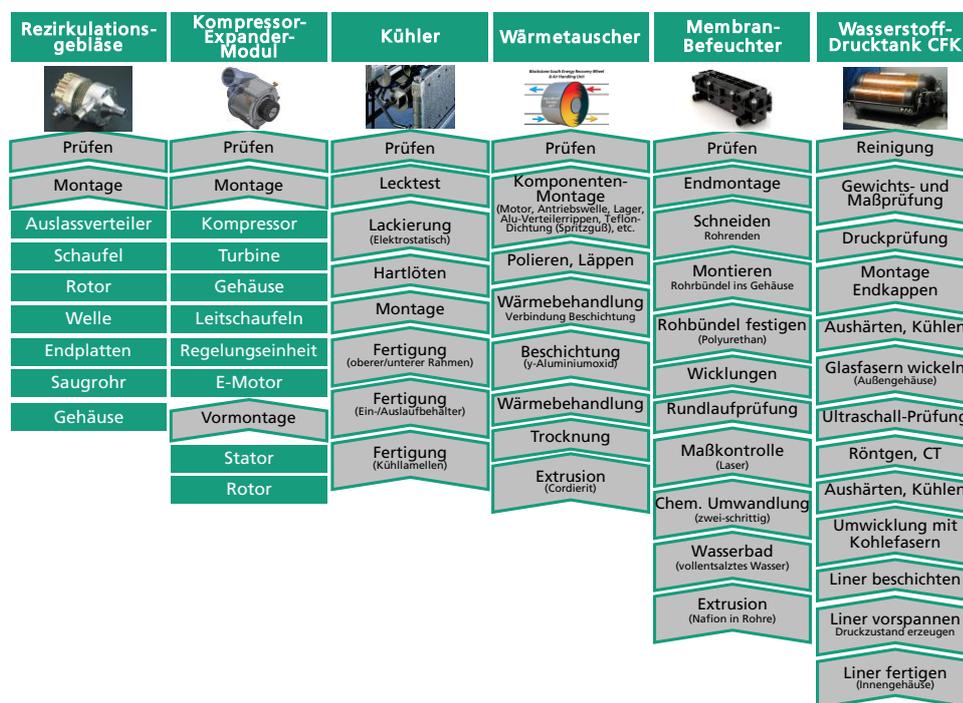


Abbildung 44: Übersicht Fertigung Komponenten Brennstoffzellensystem (Grafik: Fraunhofer IAO)

4.7.2.1 Membrane Electrode Assembly

4.7.2.1.1 Membran

In der Brennstoffzelle hat die Membran mehrere Aufgaben. Sie muss elektrisch isolierend sein, damit der Strom über die elektrische Anschlussklemme fließt und es keinen Kurzschluss innerhalb der Zelle gibt. Des Weiteren trennt sie die Gasräume der Anoden- und Kathodenseite voneinander. Wichtigstes Merkmal von elektrochemischen Membranen ist allerdings die ionische Leitfähigkeit. Diese ist bei PEM Brennstoffzellen allerdings abhängig vom Wassergehalt und der Temperatur. Daneben sind weitere Eigenschaften notwendig, wie beispielsweise das Quellverhalten bei Wasserkontakt, die Zug- und Reißfestigkeit, die Temperaturbeständigkeit und die Langzeitstabilität. (Wehrhahn, 2009, S. 109).

In der PEM Brennstoffzelle wird eine Folie aus PTFE (Polytetrafluorethylen) als Elektrolyt verwendet. Elektrolytmembranen sind inzwischen von einer Vielzahl an Hersteller kommerziell erhältlich, wie z. B. DuPont, Asahi Glass, Chloride Engineers, Tokuyama Soda, Dow Chemical und A.L. Gore. Entwicklungen an teilfluorierten und fluorfreien Membranen werden beispielsweise bei Ballard Advanced Materials, der Dais-Corporation und Aventis durchgeführt (Jörissen & Garche, 2000, S. 23). Die porösen, expandierten PTFE-Folien werden mit einer ionomeren (thermoplastischen) Beschichtung versehen, welche die Poren der Membran durchsetzt. Eine führende Rolle nimmt hierbei das Material Nafion der Firma DuPont ein. Basierend auf Patent-recherche und Expertengesprächen hat die Firma Direct Technologies im Rahmen eines Forschungsprojektes einen 8-stufigen Fertigungsprozess definiert. Dieser ist in nachfolgender Abbildung dargestellt und beschrieben (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 41) (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011).

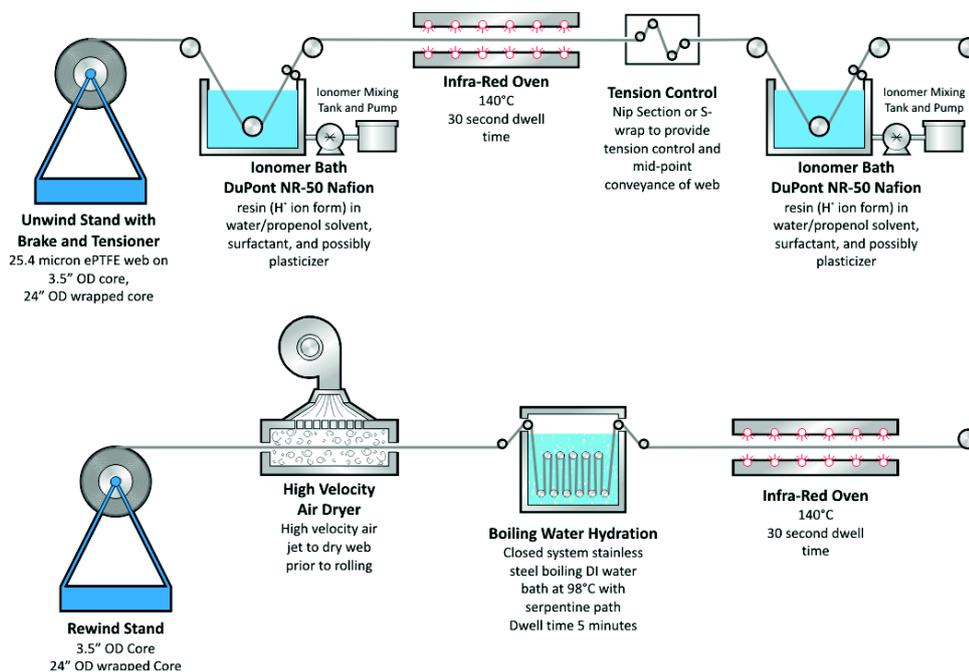


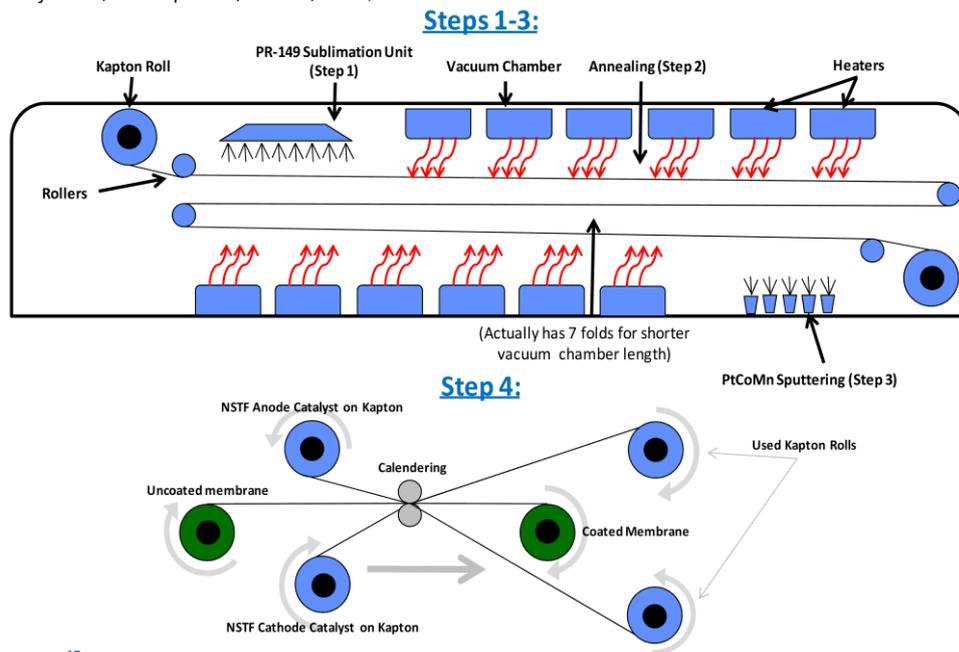
Abbildung 45: Visualisierung Fertigungsprozess Membran (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 42)

- 1. Abwicklung:** Abwickelstand mit Vorspanneinrichtung, um die bereits vorbehandelte ePTFE (expanded Polytetrafluorethylen) Folie in den Fertigungsprozess einzubringen.
- 2. Erste Ionomere Benetzung:** Das ePTFE-Substrat wird in das Ionomer Bad geführt um ein teilweises Verschließen der expandierten Poren zu erreichen
- 3. Erste Infrarot Trocknung:** Trocknung der ionomer getränkten Folie im Infrarot-Trocknungsöfen
- 4. Zweite Ionomere Benetzung:** Das Substrat wird erneut durch das Ionomer Bad geführt um ein vollständiges Verschließen der Poren sowie eine einheitliche Dicke der Membran zu erreichen
- 5. Zweite Infrarot Trocknung:** Trocknung der Folie nach zweitem Ionomer Bad
- 6. Hydratisierung im Wasserdampf:** Die Folie wird mit Wasserdampf beaufschlagt um eine vollständige Hydratisierung der Ionomere zu ermöglichen.
- 7. Luft-Trocknung:** Fokussierter Luftstrom über Düsen wird genutzt um die Folie nach der Hydratisierung zu trocknen.
- 8. Aufwicklung:** Aufwicklung der behandelten Membran auf eine Rolle für den weiteren Transport zur Katalysation

4.7.2.1.2 Katalysatorschicht und Elektrode

Infolge der niedrigen Arbeitstemperatur und des sauren Elektrolyten benötigt die PEM Brennstoffzelle Katalysatoren. Der Katalysator verringert die benötigte Aktivierungsenergie der Reaktanden für die elektrochemische Reaktion (Wehrhahn, 2009, S. 110). Er nimmt nur in Zwischenschritten an der Reaktion teil und geht unverändert aus der Reaktion hervor. Seit Beginn der 80er-Jahre gelang es durch konsequente Optimierung der Katalysatoren und der Elektrodenstrukturen den Edelmetallbedarf (insbesondere Platin, Ruthenium oder entsprechende Legierungen) auf 0,5 g/m² zu senken (BzA-BW & WRS, 2009, S. 19). Die eingesetzten Pt-Katalysatoren sind allerdings sehr anfällig gegen Vergiftung durch im Wasserstoff enthaltene Spuren von CO. Beim Einsatz reiner Pt-Katalysatoren dürfen höchstens 10 ppm CO im Wasserstoff enthalten sein (Jörissen & Garche, 2000, S. 26). Dies erfordert eine sehr effiziente Reinigung des Wasserstoffs.

Die konventionelle Katalysatorschicht besteht aus Kohlenstoffpartikeln die mit einem Katalysator durchsetzt wird (feinstverteiltes Platinpulver 0,5g/m²) (BzA-BW & WRS, 2009, S. 19). Die Elektroden können als Grafitpapier oder als Graphitfilz hergestellt werden. Dies hat den Vorteil, dass sie als Rollware für eine industrielle Verarbeitung geeignet sind. Die Katalysatoren werden entweder auf die Elektroden oder auf die PEM-Folie aufgetragen. Es ist möglich, das Sprühen, den Siebdruck und das Drucken von Katalysatoren als automatisierbare und kostengünstige Serienfertigungsverfahren zu verwirklichen (Demuß, 2000, S. 154). Nachfolgend wird ein 4-stufiger Prozess auf Basis der Beschreibung des Herstellungsprozesses skizziert (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 47), (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 5).



page 15

Abbildung 46: Visualisierung Fertigungsprozess Elektrode mit NSTF-Katalysatorschicht (Nanostructured Thin Film) (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 48)

1. **Sublimation** (Phasenübergang): Physikalische Gasphasenabscheidung von PR-149 (Perylene Red Pigment 149) auf bspw. DuPont Kapton Polyamidfolie (als temporäres Übertragungssubstrat). Ggf. ein oder mehrere Vorphasen in welchen die PR-149 im Vakuumofen vorgeheizt werden.

2. **Glühbehandlung:** Vakuum Glühbehandlung der PR-149 zur Züchtung von kristallinen Nanostrukturen durch Phasenübergänge von Platin, Kobalt und Mangan
3. **Kathodenzerstäubung:** Zerstäubung in Magnetfeldröhren von dreifachlegiertem PtCoMn Katalysatormaterial in Nanostrukturen
4. **Kathodenübertragung:** Übertragung der katalytischen Nanostruktur-Schicht von dem Kapton Trägersubstrat auf die PEM Membran mittels Heißroll-Prozessen

4.7.2.1.3 Gasdiffusionslage

Die Gasdiffusionslage (Gas Diffusion Layer GDL, auch Gasdiffusionsschicht) hat mehrere Funktionen: Als gasdurchlässiges Material gewährleistet sie den Transport der Gase (Wasserstoff und Sauerstoff) zu und von den Elektroden. Ebenfalls sorgt sie für eine gleichmäßige Verteilung der Reaktanden über die Zellfläche. Zusätzlich findet dort der Wasserabtransport statt. Hierzu ist die Gasdiffusionsschicht partiell hydrophobiert (Wehrhahn, 2009, S. 110). Die Gasdiffusionsschicht ist neben dem Stofftransport auch für den Transport der Elektronen von den Elektroden zur Bipolarplatte zuständig. Als Materialien kommen mit PTFE hydrophobierte Graphitwerkstoffe in Filz oder Papierform sowie Kompositmaterialien in Frage (Wehrhahn, 2009, S. 110). Vielfach werden zweilagige Gasdiffusionsschichten eingesetzt. (dual-layer GDL). Als Hersteller treten beispielsweise die Firmen E-Tek (Kompositmaterialien), Toray (Graphitfilz) sowie SGL Carbon (Graphitfilze) in Erscheinung (Jörissen & Garche, 2000, S. 26). Nachfolgende Abbildung stellt den Fertigungsprozess einer doppelagigen Gasdiffusionsschicht dar. Während die zur Außenseite der Bipolarplatten gerichtete Schicht makroporös und aus Kohlenstofffasern besteht, ist die zur Innenseite der Membran gerichtete Schicht mikroporös und aus PTFE und Kohlefaserpulver erstellt. Hierbei wurde erneut ein Rolle-zu-Rolle Verfahren beschrieben um eine industrielle und kontinuierliche Großserienfertigung abzubilden (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 54).

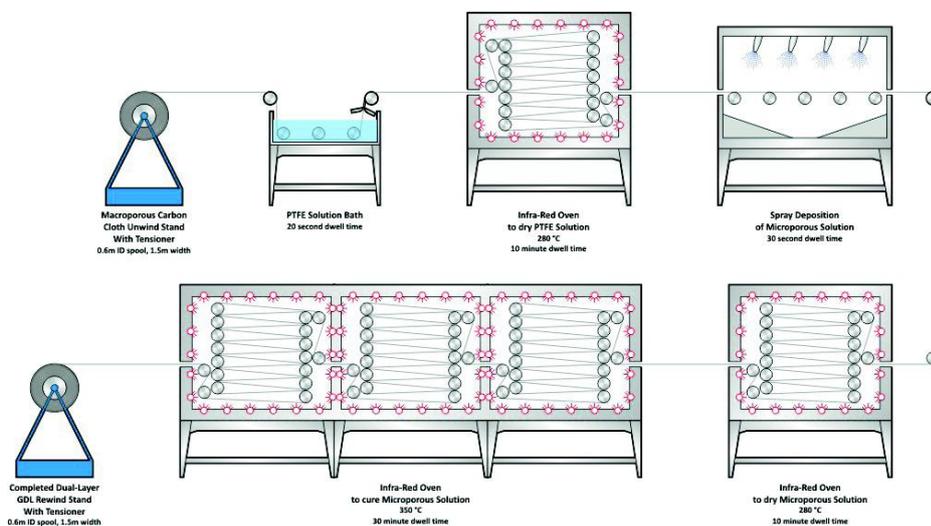


Abbildung 47: Visualisierung Fertigungsprozess Gasdiffusionsschicht mit zwei Schichten (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 54)

1. **Abwicklung:** Abwickeln der makroporösen Schicht (bspw. Graphitpapier, teils auch Graphitgewebe)
2. **PTFE-Tauchbad:** Aufbringung einer PTFE (Polytetrafluorethylen) Beschichtung, mittels Tauchbeschichtung der makroporösen Gasdiffusionsschicht in einem PTFE-Lösungsbad.
3. **Trocknung:** Trocknung der PTFE Beschichtung in einem Infrarot-Ofen.

4. **PTFE-Sprühaufrtragung:** Aufbringen einer mikroporösen Schicht aus PTFE, Lösungsmittel und Kohlefaserpulver mittels Besprühen.
5. **Trocknung 1. Stufe:** Trocknung der PTFE Beschichtung in einem Infrarot-Ofen
6. **Trocknung 2. Stufe:** Trocknung der mikroporösen Beschichtung in einem Infrarot-Ofen
7. **Trocknung 3. Stufe:** Glühbehandlung der mikroporösen Beschichtung im Infrarot-Ofen
8. **Aufwicklung:** Aufwicklung der behandelten doppelagigen Gasdiffusionsschicht auf eine Rolle als Ausgangspunkt für die Erstellung der MEA

4.7.2.1.4 Membran-Elektroden-Einheit

Die Membran-Elektroden-Einheit (MEA Membran Electrode Assembly) ist der Verbund von Membran, Gasdiffusionsschichten und Katalysator. Grundsätzlich kommen zwei Verfahren zum Aufbringen des Katalysators in Frage: Das Beschichten der Membran oder das Beschichten der Gasdiffusionsschicht. Für beide Verfahren sind kontinuierliche Produktionsverfahren entwickelt. In der obigen Ausführung wurde bereits das Verfahren der Beschichtung der Membran mit der Katalysatorschicht beschrieben. Ein wesentliches Kriterium der MEA ist eine feste Verbindung zwischen Katalysatorschicht und Elektrolytmembran (Demuß, 2000, S. 154), so dass dieser Prozess gut beherrscht sein muss. Elektrode und PEM-Folie können, wie beschrieben durch ein Heißrollverfahren miteinander verbunden werden. Die Kopplung der beschichteten Membran mit der GDL kann über eine Heißpresse erreicht werden. In nachfolgender Abbildung ist ein beispielhafter Herstellprozess abgebildet.

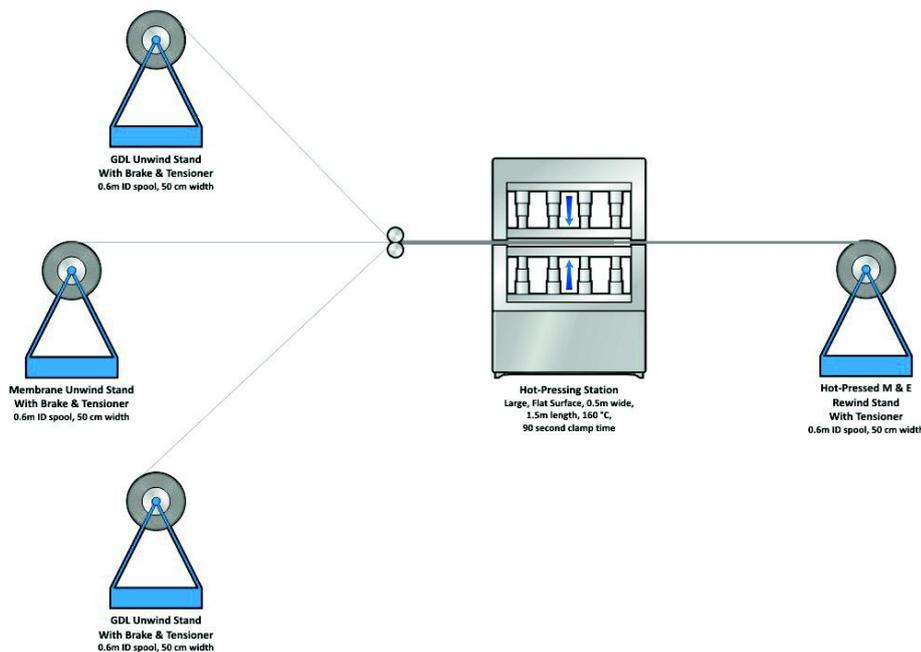


Abbildung 48: Visualisierung Fertigungsprozess Heißpressen der Membran und Gasdiffusionsschichten (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 56)

Der Fertigungsprozess des Heißpressens startet mit der **Positionierung** von drei Rollen: zwei hiervon als Gasdiffusionsschicht sowie der mit der Katalysatorschicht behandelten Membran. Die Rollen werden **abgerollt, vorgespannt und zusammengeführt**. Die zusammengeführten Schichten werden durch die **Heißpresse** geführt sowie nach der Heißpressung am anderen Ende auf einer Rolle **aufgewickelt**. Die Presszeit liegt etwa bei 90 Sekunden. Hinzu kommen ca. 3 Sekunden

Zuführ- und Öffnungszeit. Daher ist eine angepasste Größe der Presse (ca. 0,75 m²) zu wählen um einen ausreichenden Materialumsatz und Output zu gewährleisten (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 56).

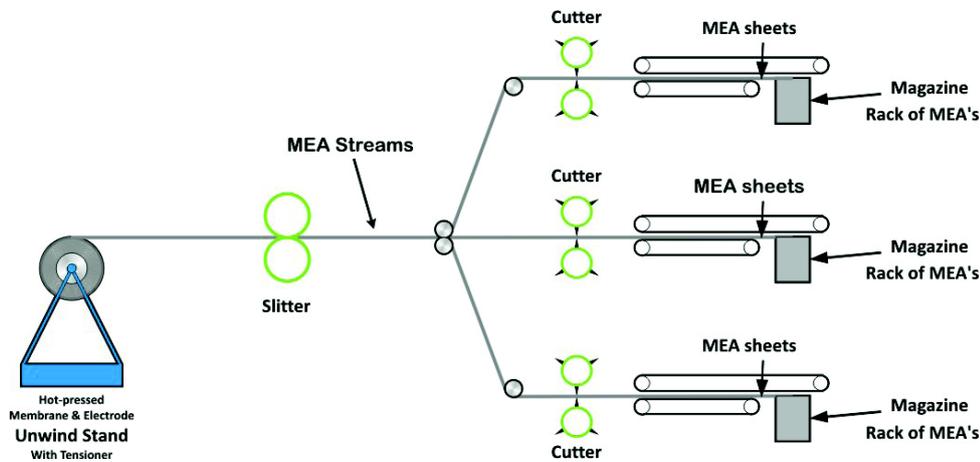


Abbildung 49: Visualisierung Fertigungsprozesse Stanzen und Schichten der MEA (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 58)

Die heiß verpresste MEA kann als nächsten Fertigungsprozess, wie in vorangegangener Abbildung dargestellt, **zugeschnitten** werden. (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 58). Die Dimensionen der Breite und Länge der MEA ist abhängig von der Geometrie der Brennstoffzellen. Nach dem Abwickeln und Zuführen wird die MEA hierfür zuerst **längs geteilt**. Dies kann durch eine Tellermesserschneidemaschine (slitter) durchgeführt werden. Anschließend werden die geteilten Bahnen einer Rollenstanze oder Zuschneidemeser (cutter) zur **Ablängung** zugeführt. Die entstandenen rechteckigen MEA Platten werden **gestapelt**. Anschließend werden die zugeschnittenen MEA zusammen mit dem Rahmen und Dichtungen **verschweißt**.

4.7.2.2 Weitere Komponenten Brennstoffzellen-Stack

Die MEA ist eines der wichtigsten und kostenintensivsten Bauteile des Brennstoffzellen-Stacks und –Systems. Des Weiteren ist aber auch eine Vielzahl weiterer Komponenten notwendig. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks in Form eines Überblicks beschrieben.

4.7.2.2.1 Bipolarplatte

Als Bipolarplatte bezeichnet man einen elektrischen Leiter, der in einem Stack die Kathode eines Zellelements mit der Anode des nächsten Elements elektrisch verbindet (BzA-BW & WRS, 2009, S. 15). Sie trennen damit benachbarte Zellen und Gasräume und dichten diese gegenseitig ab. Neben der elektrischen Kontaktierung und der Stromweiterleitung leiten sie auch einen Teil der Reaktionswärme ab und sind für die Verteilung der Reaktanden zuständig (Wehrhahn, 2009, S. 111). Bipolarplatten sind kritische Funktionselemente des PEM Brennstoffzellen-Stacks. Sie tragen auch zu einem großen Anteil der Kosten und des Gewichts des Stackts bei. Die Bipolarplatte muss folgende Eigenschaften erfüllen (Jörissen & Garche, 2000, S. 26-28):

- chemische Stabilität gegen feuchte oxidierende und reduzierende Bedingungen
- Gasdichtigkeit
- hohe Leitfähigkeit und geringe Übergangswiderstände
- niedrige Kosten (Material und Fertigung).

Bipolarplatten lassen sich in drei Gruppen einteilen: metallische Bipolarplatten, graphitische Bipolarplatten und Bipolarplatten aus Kompositmaterialien (Wehrhahn, 2009, S. 111). Während sich graphitische Materialien vor allem durch chemische Beständigkeit und geringe Übergangswiderstände auszeichnen, zeigen metallische Werkstoffe in der Regel eine bessere Gasdichtigkeit, Maßhaltigkeit und höhere elektrische Leitfähigkeiten (Jörissen & Garche, 2000, S. 26-28). Für aktuelle Prototypen kommen oftmals noch graphitische Bipolarplatten aus verschiedenen Werkstoffen und unterschiedlichsten Herstellverfahren zum Einsatz, beispielsweise: Grafoil-Platten (Ballard) als wasserdurchlässige, poröse Composite-Platten (UTCFC) oder Spritzgussplatten (SGL-Carbon) (BzA-BW & WRS, 2009, S. 16). In diesen graphitischen Bipolarplatten werden die Gaszufuhr- und Abfuhrkanäle eingefräst. Dieses Verfahren ist jedoch für eine Serienfertigung sehr aufwändig und zu teuer (Demuß, 2000, S. 155). Kostengünstiger sowie einfacher wären profilierte Bleche aus metallischen Werkstoffen. Diese Technologie soll im Weiteren genauer erläutert werden.

Als metallische Werkstoffe können Edelstähle bzw. beschichtete sonstige Werkstoffe (Aluminium, Titan etc.) Verwendung finden. Diese können bereits als sogenannte Coilware gewalzt und aufgerollt in den Prozess eingebracht werden. In einer **mehrstufigen Presse** werden die notwendigen Eigenschaften und Funktionen durch Ablängen, Lochstanzen, Tiefziehen etc. eingebracht. Nachfolgende Abbildung zeigt einen 4-stufigen Prozess. In der Literatur finden sich Aussagen auf einen bis zu 7-stufigen Prozess der im Anschluss ebenfalls graphisch dargestellt wird (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6).

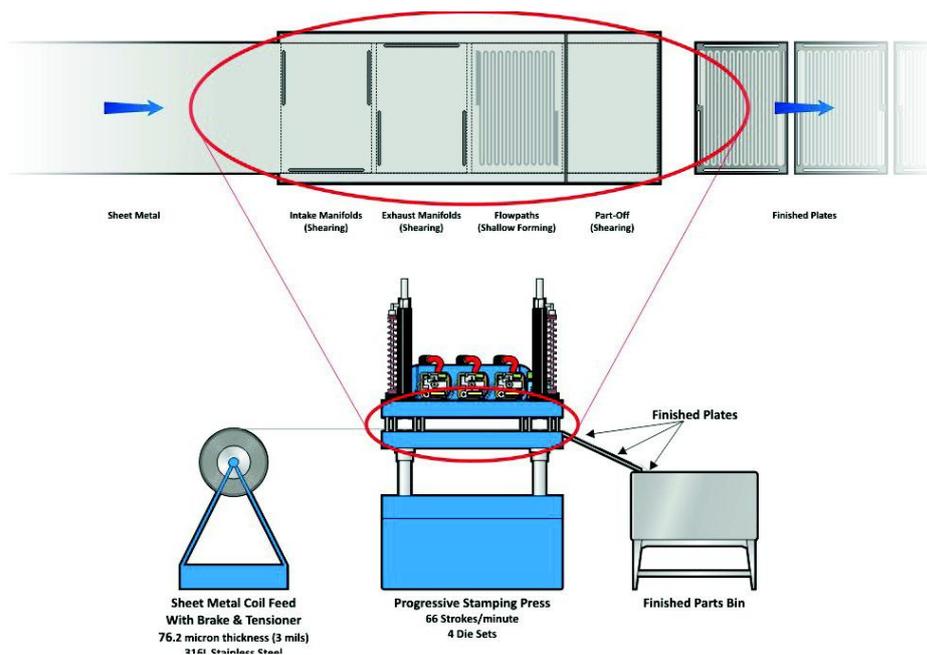


Abbildung 50: Visualisierung Fertigungsprozess Bipolar-Platten (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 29)

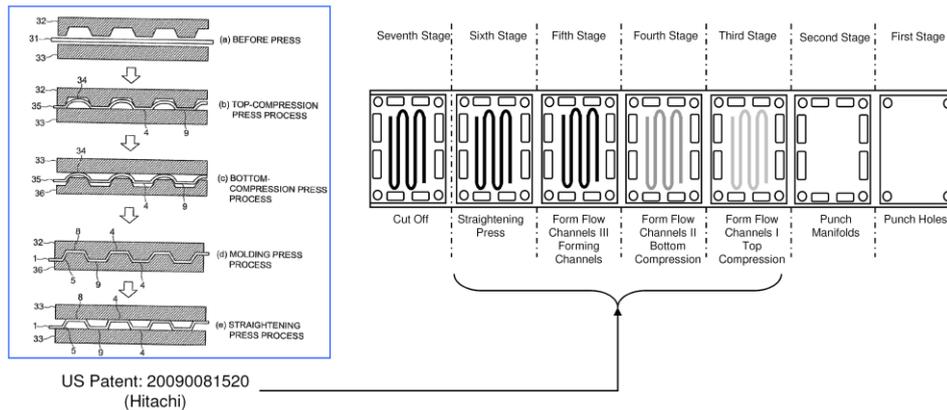


Abbildung 51: Detaillierung 7-stufiger Fertigungsprozess für metallische Bipolarplatten (Sinha & Yang, 2010, S. 41)

Diese geprägten metallischen Platten können anschließend **zusammengeschweißt** werden. Hierbei wird ein Hohlraum geschaffen, in welchem das Kühlmedium zur Kühlung der beiden Platten geführt werden kann. Das **Laserschweißen** der beiden Bipolarplatten wird als kostengünstigste Technologie im Vergleich zur **Einspritzung einer Polymerdichtung** oder **Siebdruckverfahren** zum Aufbringen einer Dichtung bevorzugt (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6). Ein komplett robotergestütztes Positionieren der Platten sowie Schweißen ist dabei für eine hohe Qualitätsgenauigkeit sowie gute Ausnutzung des Lasers notwendig.

Kommen metallische Werkstoffe wie Bleche aus Edelstahl zum Einsatz müssen diese **beschichtet** werden um sie gegen die korrosiven Prozessgase zu schützen (BzA-BW & WRS, 2009, S. 17). Hierbei werden folgende Verfahren als möglich und in der Entwicklung für die Anwendung bei Bipolarplatten angesehen (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 35):

- Nitrierung (mit Stickstoff oder Ammonium)
- physikalische Gasphasenabscheidung (Gold, TiN, etc.)
- Galvanotechnik
- Abbeizen (bspw. mit Salzsäure oder Schwefelsäure)

Die Oberflächen werden durch **chemisches Reinigen** und/oder Aufrauung (ggf. durch **Rau- oder Sandstrahlen**) auf die nachfolgende **Beschichtung** vorbereitet. (Demuß, 2000, S. 155). Als Material zur Oberflächenbeschichtung käme beispielsweise auch Gold in Frage. Wenn dieses auch nur auf einer Seite der Bipolarplatte eingesetzt werden müsste (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6), wird dies jedoch aufgrund der hohen Materialkosten als unrealistisch eingeschätzt (Demuß, 2000, S. 155). Als Technologie zur Oberflächenbeschichtung wird Spritzen als sehr geeignet angesehen (Demuß, 2000, S. 155). Da eine Verfügbarkeit dessen noch nicht gesehen wird, geht man aktuell von einem Einsatz **chemischer Beschichtungsverfahren** wie **Nitrierung** aus.

4.7.2.2.2 Dichtungen

Dichtungen werden in Brennstoffzellen benötigt um eine Vermengung der durch die Membran separierten Reaktionsmedien an den Zellrändern zu vermeiden. Auch ein Austritt aus dem System soll so verhindert werden (Wehrhahn, 2009, S. 112). Als Materialien können bei Niedertemperaturbrennstoffzellen verschiedene Polymere verwendet werden, wie beispielsweise Silikone aber auch Produkte wie Loctite (Henkel), welche direkt auf die Bipolarplatte aufgebracht werden (Wehrhahn, 2009, S. 112). Auch ist es möglich mittels Schweißungen (wie oben beschrieben) metallischen Bipolarplatten untereinander zu dichten oder Dichtungen einzulegen und

einzukleben (Demuß, 2000, S. 155) (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 66). Dichtungen können dabei sowohl in die Bipolarplatten als auch in die MEA Einheiten funktionell integriert werden (Jörissen & Garche, 2000, S. 28). Generell lassen sich folgende drei Verfahren der Herstellung und Anbringung unterscheiden:

- **spritzgegossene Dichtungen**
- **laserverschweißte Dichtungen**
- **siebgedruckte Dichtungen**

Flüssigkeitsdichtungen für das Kühlmedium werden nicht nur zwischen den Bipolarplatten selbst benötigt, sondern auch zwischen den Bipolarplatten und der MEA Einheit, beziehungsweise der Endplatte. Hierbei scheidet aufgrund Größen und Materialunterschieden eine Verschweißung aus. Jede der genannten Dichtungen weist charakteristische Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile auf, die je nach vorliegenden Systembedingungen und Notwendigkeit unterschiedlich zu bewerten und auszuwählen sind. Eine detaillierte Beschreibung und Bewertung der verschiedenen Verfahren findet sich bspw. bei *James et al. (2010)* (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 66). Generell weisen Brennstoffzellenstapel (auch durch die Vielzahl an gestapelten Elementen) erhebliche Längen an Dichtkanten auf. Daher kommt einem günstigen aber auch wirksamen Dichtungskonzept eine erhebliche Bedeutung zu.

4.7.2.2.3 Endplatte

Endplatten werden an beiden Enden des Stacks angebracht und über Verbindungen zusammengehalten um die Zellen mechanisch zu fixieren und anzupressen. Diese Verbindung erfolgt in der Regel über Bolzen am Rand der Zellen oder über Zuganker durch die Zellfläche (Wehrhahn, 2009, S. 112). Neben **Schraubverbindungen** können auch **Metallbänder** verwendet werden. Bei der Anpressung ist eine gleichmäßige Druckverteilung über die gesamte Aktivfläche wichtig um eine optimale Stromableitung zu gewährleisten. Daher ist eine hohe Steifigkeit der Endplatten gefordert. Trotz der hohen mechanischen Anforderungen sollten die Endplatten das Gewicht des Brennstoffzellen-Stacks möglichst wenig erhöhen. Bei ihrer konstruktiven Auslegung muss daher auf leichte Materialien und steife Strukturen geachtet werden (Jörissen & Garche, 2000, S. 28). Sollen die Endplatten des Weiteren direkt als Isolator verwendet werden ist auf eine geringe Leitfähigkeit zu achten, um einen Kurzschluss des Stacks zu verhindern (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 76). Die Funktionen der Endplatte sind damit im Überblick:

- mechanische Fixierung der Zellen und des Zellstapels
- Gewährleistung einer gleichmäßigen Druckverteilung über die aktive Fläche
- Abschluss und Schutz des Stacks
- Anschlussstelle und Verbindung mit den Stromkollektoren
- elektrische Isolation
- Endplatte enthält in der Regel auch die Zu- und Abfuhr der Medien.

Die Endplatten können aufgrund des einfachen Aufbaus durch **Gießprozesse** gefertigt werden. Anschließend folgt die **mechanische Bearbeitung** wie Entgraten, Bohren, Senken, Reiben und Fräsen (Demuß, 2000, S. 155). Ebenfalls findet sich in der Literatur der Hinweis darauf, dass die Endplatte als **Feinstanzteil** aus V4a hergestellt werden kann (BzA-BW & WRS, 2009, S. 21).

4.7.2.2.4 Stromkollektoren

Um den in der Brennstoffzelle erzeugten Strom ableiten zu können sind Stromkollektoren notwendig. Diese bestehen meist aus Kupfer- oder Aluminiumfolien und können Mikrostrukturen aufweisen. Die Herstellung der Stromabnehmer erfolgt mit **Schneide- und Stanzprozessen** sowie **Lötung** (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 65), (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6). Generell

wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um Zukaufteile handelt (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6). Zur Isolation zwischen der Endplatte und den Stromkollektoren kann eine gestanzte PTFE Folie eingesetzt werden (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6). Teilweise wird in der Literatur eine Integration der Stromabnehmer in die Endplatten beschrieben (BzA-BW & WRS, 2009, S. 21). Hierbei wäre auf eine resistente **Beschichtung** (bspw. Gold oder andere korrosionsbeständige Stoffe) zu achten.

4.7.2.2.5 Stackgehäuse

Das Stackgehäuse umgibt den Brennstoffzellen-Stack. Dieses ist insbesondere für den Schutz der Brennstoffzellen-Stacks auszulegen. Die grundlegenden Funktionen des Stackgehäuses sind wie folgt im Überblick dargestellt:

- Schutz vor physikalischer Beschädigung durch externe Faktoren (bspw. Elemente oder Flüssigkeiten auf der Straßenoberfläche)
- Schutz vor elektrischem Kurzschluss
- thermische Isolierung

Das Stackgehäuse kann beispielsweise aus einer **vakuum-wärmeumgeformten** Polypropylen Hülle gefertigt werden. Das Ausgangsmaterial wird mit Hilfe eines **Vakuum-Tiefziehgeräts** in die benötigte Endform gebracht. Diese Fertigung kann für hohe Stückzahlen vollautomatisiert ablaufen (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 78). Im Anschluss erfolgt eine **Montage und Verbindung** des Gehäuses mit dem Brennstoffzellen-Stack.

4.7.2.3 Wasserstoffdrucktank

Wie bereits beschrieben fokussiert das Forschungsprojekt die Wasserstoff-Brennstoffzelle mit der Speicherung des Wasserstoffs in Hochdrucktanks. Die Speicherung des Energieträgers Wasserstoffs kann generell durch eine Vielzahl von Technologien erfolgen. Eine Übersicht soll nachfolgend gezeigt werden (Wurster, 1997), (Ahluwalia, Hua, Peng, Lasher, McKenney, & Sinha, 2009, S. 60):

- Druckgasspeicherung durch Drucktanks
- Flüssiggasspeicherung (des flüssigen Wasserstoffs) durch Kryotanks oder Kryodrucktanks
- Weitere Speicherformen basierend auf chemischen oder physikalischen Verbindungen, wie Metallhydridtanks, Adsorptionsspeicherung oder Speicherung mittels chemisch gebundenen Wasserstoffs.

Das typische Druckniveau für gasförmigen Wasserstoff in Druckbehältern beginnt bei 200 bis 300 bar. Für den Kfz-Bereich sind inzwischen 700 bar Tanks üblich. Drucktanks bis zu 1200 bar sind technisch möglich. Hierdurch kann die mitgeführte Energiemenge erweitert werden ohne dass sich gravierende Änderungen auf den Bauraumbedarf ergeben. Dadurch ergibt sich eine Verlängerung der Reichweite der Brennstoffzellen Fahrzeuge. Die Verdichtung ist allerdings auch mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Ebenfalls werden dadurch hohe Anforderungen an den Verdichter sowie den Drucktank gestellt.

Das Drucktank-System für ein Wasserstoff-betriebenes Brennstoffzellenfahrzeug besteht in der Regel aus mehreren Drucktanks, Druckminderer, Ventilen, Leitungen, etc. Die Drucktanks bestehen meist aus einer Innenhülle, dem sogenannten Liner, sowie einer faserverstärkten Außenhülle. Bei kryogenen Drucktanks muss zusätzlich eine mehrlagige Vakuum-Isolationsschicht eingesetzt werden. Im automobilen Bereich werden meist mehrere (zwei bis drei) zylindrische Drucktanks eingesetzt. Dies geschieht insbesondere für eine Optimierung des Platzbedarfs. Um eine bestmögliche Ausnutzung des Bauraums zu erlangen, könnten auch bauraumkonform ange-

passte Formen verwendet werden (Satyapal, Petrovic, Read, Thomas, & Ordaz, 2006) nach (Lawrence Livermore National Laboratory Project Report, 2005)). Diese Entwicklung ist allerdings zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht absehbar, so dass im Rahmen des Forschungsprojektes weiterhin von zylindrischen Bauformen ausgegangen wird.

Grundsätzlich können auf verschiedene Technologien bei der Konzeption des Drucktanks zurückgegriffen werden. Beispielsweise eine Innenhülle (Liner) aus Kunststoff oder ein Liner aus nahtlosem Stahl- oder Aluminiumrohr sowie glas- oder kohlefaserverstärkte Kunststoffe in der Außenhülle. Auch sind mehrlagige Außenhüllen beispielsweise aus CFK und GFK möglich. Eine Einteilung der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten des Drucktanks findet sich beispielsweise bei (Mori & Hirose, 2009, S. 3).

- Drucktank komplett aus reinem Metall
- Liner aus Metall und Außenhülle aus glasfaserverstärktem Kunststoff
- Liner aus Metall und Außenhülle aus kohlefaserverstärktem Kunststoff
- Liner aus Kunststoff und Außenhülle aus kohlefaserverstärktem Kunststoff

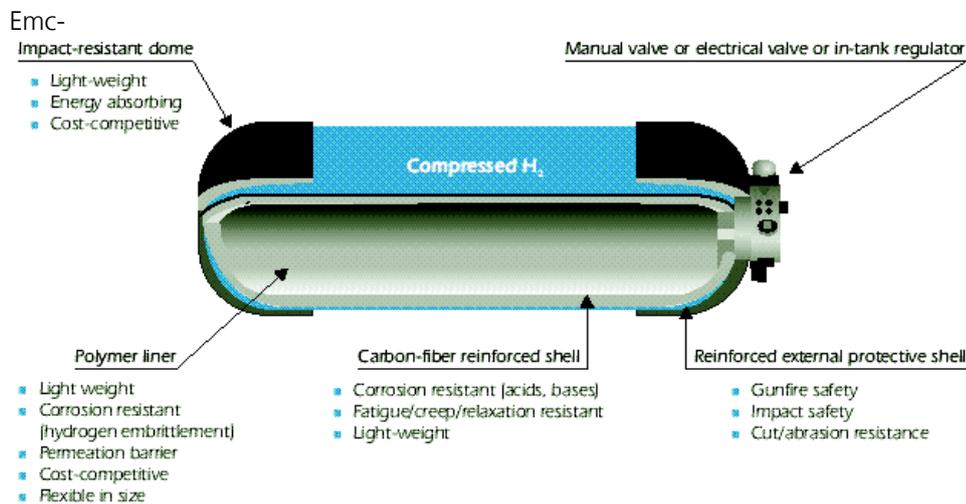


Abbildung 52: Beispielhafte Darstellung des Aufbaus eines Hochdrucktanks (emc2, 2012)¹

Alle beschriebenen Technologien haben eine Zulassung bis 700 bar und könnten im automobilen Bereich Einsatz finden. Bisher sind jedoch nur wenige Firmen auf dem Markt, die diese Technologien beherrschen (Quantum, Dynetek, Lincoln Composite) (BzA-BW & WRS, 2009, S. 27). Es ist daher schwierig abzusehen, ob es sich bei dem Tank um ein Zukaufteil handeln wird. Aufgrund der hohen Anforderungen an diese Komponente, geht das Forschungsprojekt allerdings von einer Eigenfertigung aus. Als Grundlage für die Analyse wurde eine Metall Innenhülle sowie eine CFK-Ummantelung und GFK-Außenhülle gewählt. Zu berücksichtigen ist, dass die Kosten für die Carbonfasern und deren Verarbeitung zur Ummantelung und Verstärkung des Drucktanks einen Großteil der Gesamtkosten des Tanksystems darstellen. Die Auswahl der Fasern sowie die Prozessdefinition ist dabei von großem Einfluss (Satyapal, Petrovic, Read, Thomas, & Ordaz, 2006, S. 5).

¹ Bildmaterial: Quantum Technologies CGH2 Tank System

Die grundlegenden Fertigungsschritte bei der Erstellung des Drucktanks sind wie folgt definiert worden (Lasher, 2010, S. 22): Bereitstellung des zylindrischen Ausgangsmaterials (beispielsweise Aluminium) für die Metall Innenhülle (Liner), **Umformprozess** des Liners zur Fertigung der geometrischen Form der Innenhülle sowie anschließende Vakuum-Dichtheitstests. Anschließend zur Fertigung der ersten Schicht erfolgt eine **Druckbeaufschlagung** und **Beschichtung** des Liners. Dieser wird anschließend in der **CFK-Wickelanlage** umwickelt und in ein **Harzbad** (Resin-Bad) getaucht und anschließend in einen **Härte- und Trocknungsofen** gegeben. Anschließend erfolgt eine **Prüfung mittels Ultraschall**. Nach Fertigung und korrekter Prüfung der Innenhülle werden die **Glasfasern** der Außenhülle über den bisher erstellten Tank gewickelt. Anschließend erfolgt erneut eine **Aushärtung** und **Kühlung**. Nach dem Abschluss der Fertigung des Drucktanks werden die Endkappen **montiert** und **Tests (Dichtigkeit, Maßhaltigkeit)** durchgeführt. Nach einer abschließenden **Reinigung** kann der Drucktank mit den weiteren Komponenten des Tanksystems zusammen montiert werden. Der Druckminderer reduziert den Druck von 700 bar im Druckbehälter auf etwa 10 bar. Daher werden hohe Ansprüche hinsichtlich Fertigungstoleranzen und Materialauswahl an diese gestellt. Die Druckminderanlage wird anschließend mit dem Drucktank **montiert**.

4.7.2.4 Brennstoffzellen-System

Neben der Fertigung der einzelnen Komponenten des Brennstoffzellen-Stacks sowie des Systems nimmt auch die Montage einen hohen Stellenwert ein. Während die Montage des Stackes teil- bis hochautomatisiert ablaufen kann, ist die Montage des Gesamt-Systems nur halbautomatisiert, mit vielen manuellen Tätigkeiten und mit höherem Personalbedarf möglich. Nachfolgend sollen die notwendigen Prozesse für die Herstellung des Brennstoffzellen-Systems beschrieben werden.

4.7.2.4.1 Stackmontage

Die Stackmontage kann in mehrere Montagephasen (Vorbereitung, Stackmontage, Endmontage, Verpressen) sowie eine anschließenden Dichtigkeitstest unterteilt werden. Ein finaler Gesamttest wird bei der anschließenden Stack-Konditionierung durchgeführt. Nachfolgende Abbildung zeigt die grundlegenden Prozessschritte der Stackmontage.

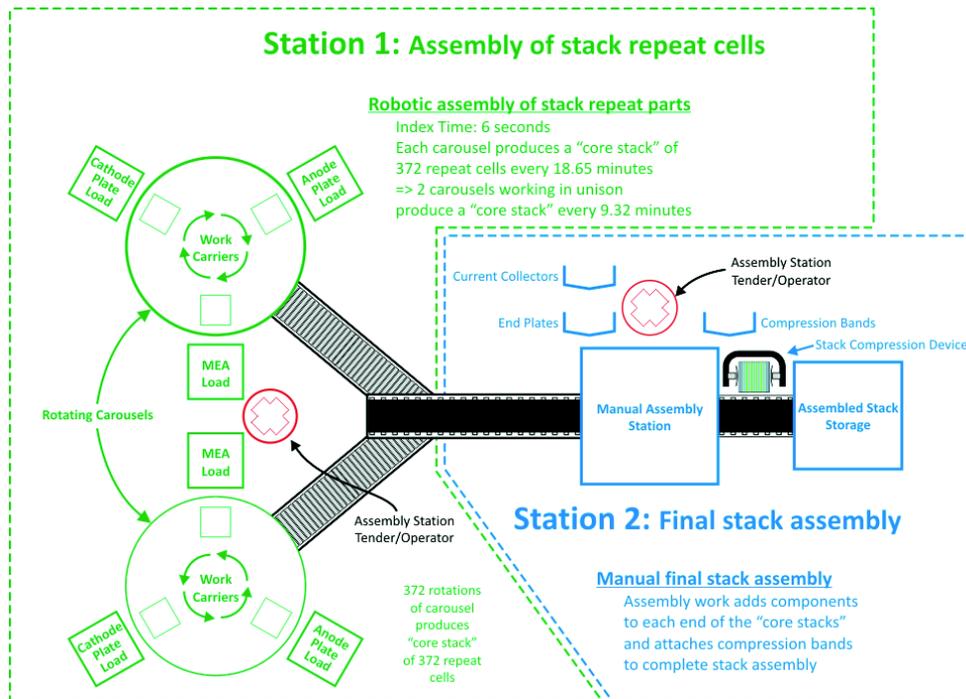


Abbildung 53: Visualisierung Fertigungsprozess halbautomatische Stack-Montage (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 77)

Bei der Vorbereitung erfolgt eine **Positionierung** der Montagevorrichtung und der Endplatte, um in der anschließenden Stackmontage eine exakte Ausrichtung der Elemente zu ermöglichen (Wehrhahn, 2009, S. 129). In der Stackmontage werden die Zellelemente alternierend aufeinander **geschichtet**. Abhängig von dem verwendeten Stackdesign handelt es sich dabei wie beschrieben um die MEA, sowie Bipolarplatten und ggf. separate Dichtungen. Ab der Stückzahl von etwa 1.000 Einheiten wird von einer wirtschaftlichen Automatisierung der Stackmontage ausgegangen (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 76). Des Weiteren trägt die Automatisierung zu einer verbesserten Produktqualität bei. In der Endmontage werden die Stromkollektoren integriert, die zweite Endplatte **aufgesetzt** sowie ggf. lose **verschraubt**. Hierbei wird von manuellen Tätigkeiten ausgegangen (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 76). Zuletzt wird der Stack **in einer Presse komprimiert** und mittels **Zuganker festgezogen**. (Demuß, 2000, S. 155). Alternativ zur Verwendung von Zuganker oder Schrauben können auch Metall-Bänder eingesetzt werden (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 6). Beispielsweise wird die Verwendung von 2 Edelstahlbändern in einem Patent von Ballard Power Systems beschrieben, welche um den Stack geführt werden. Diese werden nach der **Verpressung des Stacks** mittels **Punktschweißung** fixiert. (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 76). Im Anschluss an die Fertigstellung des Stacks wird dieser einer **Dichtigkeitsprüfung** unterzogen. Hierbei werden sowohl das Wasserstoff-Management, das Luftmanagement sowie das Kühlflüssigkeitsmanagement überprüft. Hierbei handelt es sich um einen Kurztest, um die Gas- und Flüssigkeitsdichtigkeit zu verifizieren. Ein kompletter Leistungs- und Funktionstest wird im Rahmen der anschließenden Stack-Konditionierung durchgeführt (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 76).

4.7.2.4.2 Stack-Konditionierung

Die Stack-Konditionierung ist als mehrstufiger Prozess zu verstehen, welcher die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellen-Stacks vorbereitet und testet. Die Konditionierung wird direkt im Anschluss an die Stackmontage durchgeführt. Es handelt sich hierbei um eine Serie von definierten **Polarisations-Tests**. Ein beispiel-

hafter Prozess der Stack-Konditionierung nach einem Patent der UTC Fuel Cell ist bei James et al. (2010) (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 80) aufgezeigt und in nachfolgender Abbildung dargestellt.

	Step	DC Power Supply					Current Density
		Gas on Anode	Gas on Cathode	Primary Load Switch	Positive Terminal	Electrode Potential	
Cathode Filling Cycles	1	4% H ₂ -N ₂	N ₂	Open	Connected to Cathode	Cathode 0.04V to 1.04V	Low
	2	4% H ₂ -N ₂	N ₂	Open	Connected to Cathode	Cathode 0.04V to 1.04V	Low
	3	Repeat Step #1					Low
	4	Repeat Step #2					Low
	5	Repeat Step #1					Low
	6	Repeat Step #2					Low
Anode Filling Cycles	7	N ₂	4% H ₂ -N ₂	Open	Connected to Anode	Anode 0.04V to 1.04V	Low
	8	N ₂	4% H ₂ -N ₂	Open	Connected to Anode	Anode 0.04V to 1.04V	Low
	9	Repeat Step #7					Low
	10	Repeat Step #8					Low
	11	Repeat Step #7					Low
	12	Repeat Step #8					Low
Performance Calibrations	13	H ₂	Air	Closed	Not Connected	Depends on Current Density	0-1600 mA/cm ²
	14	Repeat step #13 up to 10 times					

Abbildung 54: Beispielhafte Stack-Konditionierung (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 80)

Zur Erreichung einer 95-prozentigen Leistungsfähigkeit werden aktuell etwa 5 Stunden angesetzt. Eine volle Leistungsfähigkeit wird schätzungsweise nach 13 Stunden erreicht (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 79). Es ist wird von weiteren Verbesserungen im Prozess ausgegangen und eine Reduzierung der Dauer der Konditionierung auf bis zu 3 Stunden angenommen (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 79). Bereits heute ist eine Parallelisierung der Tests mehrerer Stacks möglich und im Einsatz (Marcinkoskia, James, Kalinoski, Benjamin, & Kopaszcz, 2011, S. 6).

4.7.2.4.3 Systemmontage

Die Systemmontage unterscheidet sich grundlegend von der Stackmontage, da hier keine homogenen, sondern sehr unterschiedliche Komponenten verbaut werden (Wehrhahn, 2009, S. 129). Neben der Art und Funktion unterscheiden sich diese auch in ihrer Geometrie und Handhabung. Des Weiteren ist auch der Umgang mit beispielsweise biegeschlaffen Teilen wie Kabel sowie komplexe Montageprozesse zu gewährleisten. Die bei der Systemmontage zusammenzuführenden Komponenten sind insbesondere: der Brennstoffzellen-Stack, Balance of Plant (Komponenten für den Wasserstoff-Kreislauf, das Sauerstoff-Kreislauf sowie den Kühlkreislauf), der Wasserstoffdrucktank sowie Sensorik und Elektronik. Nachfolgende Abbildung zeigt das fertig montierte Gesamtsystem eines aktuellen Brennstoffzellen-Systems und eine mögliche zukünftigen Gestaltung dessen.



Abbildung 55: Heutiges und zukünftiges Brennstoffzellen-System Darstellung am Beispiel GM (GM Inside News, 2010)

Die Montage des Gesamtsystems kann für geringe Stückzahlen bis etwa 1.000 Einheiten jährlich an einer **Einzelstation** durchgeführt werden (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 105). Hierzu sind wenige kundenspezifische Systeme oder Maschinen notwendig. Der Aufbau einer **Montagelinie** ist für Stückzahlen von etwa 30.000 bis 500.000 Einheiten jährlich geeignet. Hierbei ist etwa von 10 Montagestationen auszugehen, welche die Brennstoffzellen-Systeme sequentiell nacheinander durchlaufen. Es wird angenommen, dass durch eine Montagelinie die kumulative Zeit des gesamten Montageprozesses um etwa 20 Prozent reduziert werden kann (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 105). Nach Abschluss der Systemmontage wird mit dem fertig gestellten Brennstoffzellen-System ein etwa 10-minütiger **Funktions- und Leistungstest** durchgeführt. Da die Stacks bereits im Vorfeld einer mehrstündigen Konditionierung unterzogen wurden, kann auf eine weitere Testphase dieser Bauteile verzichtet werden. Der abschließende Test fokussiert daher auf die Funktionsfähigkeit der zusätzlichen Komponenten sowie das Zusammenspiel dieser und deren Kopplung mit dem Stack (James, Kalinoski, & Baum, 2010, S. 106).

4.8 Abschließende Gesamtbetrachtung der Fertigung der Komponenten des neuen Antriebsstrangs

Die Untersuchung zeigt, dass sich die zukünftige Herstellung von Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs in vielen Bereichen wandeln wird. Um die sehr hohen Anforderungen im automobilen Bereich (Kostenziele, Qualitätsanforderungen, Sicherheitsaspekte, Bauraumvorgaben, etc.) zu erfüllen werden Prozessoptimierungen in bestehenden Vorgängen und sogar der Einsatz gänzlich neuer Produktionstechnologien erforderlich sein.

Bei der Komponente der **elektrischen Maschine** stehen vor allem Aspekte beim Wickeln der Drahtspulen (Erhöhung des Füllfaktors und Wirkungsgrads), die Steigerung des Automatisierungsgrads und Verbesserung von Handhabungsvorgängen in der Montage sowie wesentliche Vorgänge in der Qualitätssicherung durch intelligente Prüf- und Testverfahren im Fokus zukünftiger Forschungsanstrengungen.

Die **Traktionsbatterie** als eine der Schlüsselkomponenten zeichnet sich durch zahlreiche aufwändige Produktionsprozesse aus. Die Bandbreite eingesetzter Produktionstechnologien ist hierbei enorm. Kritische Prozessschritte auf dem Weg zu einer Großserienfertigung stellen beispielsweise die elektrische Kontaktierung der Zellleiter in der Batteriemodul-Herstellung oder die Verschraubung der Zellmodule mit dem Gehäuse in der Batteriesystem-Montage dar. Hier wird derzeit der Einsatz neuer Produktionstechnologien wie Laser- oder Ultraschallschweißen diskutiert oder die Integration von hochmodernen Vertikalknickarmrobotern in der Endmontage erforscht. Auch der Einsatz neuer Kunststoff-Materialien beispielsweise beim Batteriegehäuse kann zukünftig zu einem Fortschritt in der Erreichung der gesetzten Ziele beitragen.

Das **Leistungselektronik-System** und dessen Herstellung sind geprägt von sehr hohen Anforderungen hinsichtlich der Einsatztemperaturen der Bauteilkomponenten des Systems. Um den Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, müssen sämtliche Herstellprozesse, und –technologien, welche einen direkten negativen Einfluss auf die Bauteilqualität haben eliminieren werden. Fertigungstechnologien wie das Löten oder herkömmliche Bonding-Prozesse begrenzen vielerorts die Ausnutzung neuer Halbleiter Technologien (z.B. Siliciumcarbid (SiC)). Der moderne Einsatz der Sinter-technologie zur Substitution von jeglichen Löt-, Bondverbindungen oder von Wärmeleitpasten wird derzeit stark erforscht.

Das **Brennstoffzellen-System** ist das Herz des Brennstoffzellenfahrzeuges. Zentrale Komponenten hierbei sind der Brennstoffzellen-Stack mit seinen Subkomponenten MEA (Membran-Elektroden-Einheit) und Bipolarplatten. Die Fertigungsprozesse der Komponenten der MEA weist Parallelen zur Zellfertigung der Batterien auf und erfordert chemische Kompetenz durch bspw. Beschichtungsprozesse. Hiervon ist die Qualität des Produktes entscheidend abhängig. Auch sind neue Produktkonzepte notwendig, um die Kosten der Komponenten sowohl durch die Notwendigkeit des benötigten Materials, als auch die Kosten der Fertigung zu reduzieren. Das Gesamtsystem weist eine hohe Komplexität durch die Vielzahl an Komponenten auf und zeigt einen hohen Montageaufwand. Hier ist ähnlich zum Verbrennungsmotor die Integration und Abstimmung unterschiedlicher Komponenten zu gewährleisten.

Der **Wasserstoffdrucktank** stellt erhebliche Herausforderungen hinsichtlich Wahl des Konzepts, der Materialien sowie des Fertigungsprozesses. Durch den hohen Arbeitsdruck und dessen Einsatzbedingungen (bspw. Unfallsicherheit) ergeben sich höchste Anforderungen an das Produkt. Ein Zielkonflikt ergibt sich weiterhin unter Berücksichtigung des Kostendrucks in der Automobilindustrie. Auch besteht bisher

nur bedingtes Know-how in der Automobilindustrie im Umgang mit neuen Werkstoffen (bspw. CFK), welche hier Einsatz finden können.

.....
Produktionsprozesse von
Komponenten konventioneller
und neuer Antriebsstränge
.....

5 Ermittlung Personalbedarf auf Komponentenebene

Autoren: Prof. Dr. Wilhelm Bauer (Fraunhofer IAO), Simon Voigt (Fraunhofer IAO), Florian Rothfuss (Fraunhofer IAO)

Eine weitere Forschungsfrage ist, welche quantitativen Auswirkungen sich auf den Personalbedarf durch die Produktion der Komponenten des neuen Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang ergeben? Dieser Frage soll im Rahmen des aktuellen Kapitels nachgegangen werden. Hierbei wird der Personalbedarf für die Komponenten des neuen sowie des konventionellen Antriebsstrangs ermittelt. Dies erfolgt stückzahlabhängig für große und mittlere bzw. niedrige Stückzahlen. Die Ergebnisse hieraus fließen direkt auch in das nächste Kapitel ein. Dort werden diese weiterbearbeitet, um den Einfluss der Elektrifizierung unter Berücksichtigung der erstellten ELAB-Szenarios auf den Gesamt-Personalbedarf in einer idealtypischen Aggregatproduktion analysieren zu können.

5.1 Allgemeines Vorgehen und Methodik

Da im Forschungsprojekt, wie beschrieben, die Effekte und Auswirkungen der Elektrifizierung auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion analysiert werden, wurde die Erhebung des Personalbedarfs auch auf die Produktion fokussiert. Ein sich unweigerlich durch die Elektrifizierung ergebender zusätzlicher Personalbedarf in Forschung und Entwicklung wurde daher nicht aufgenommen oder analysiert. Ebenfalls erfolgte keine Aufnahme von möglichen Änderungen im Bereich Verwaltung, allgemeine Planung, etc. Eine Klassifizierung der analysierten Tätigkeiten in der Produktion erfolgte in die Bereiche direkte Mitarbeiter, produktionsnahe indirekte Mitarbeiter sowie indirekte Mitarbeiter. Um die Vergleichbarkeit zum aktuellen Status quo gewährleisten zu können, wurden die Daten zum Personalbedarf sowohl für die konventionellen Komponenten als auch für die neuen Komponenten erhoben.

Um den Einfluss des Technologiewandels hin zur Elektromobilität auf die Wertschöpfung zu quantifizieren und letztlich die Auswirkungen auf die Beschäftigungsstruktur analysieren zu können, ist es notwendig die Produktionsprozesse sowie eingesetzten Technologien zu kennen. Diese wurden im vorangegangenen Kapitel erläutert. Basierend auf den definierten Komponenten und analysierten Prozessen wurden Abschätzungen für den Personalaufwand angesetzt. Insbesondere entstand eine große Datenbasis an Primärdaten durch die Durchführung von Interviews mit Experten für die jeweiligen Komponenten. Diese Analyse wurde durch weitere Sekundärdaten anhand von Literaturangaben, Geschäftsberichten sowie bereits durchgeführter Projekte und Erfahrungen der Forschungspartner erweitert und optimiert. Die zusammengefassten Ergebnisse der ersten Analyse wurden durch eine Delphi-Befragung und weitere Expertengespräche validiert. Ebenfalls erfolgte eine Präsentation und Diskussion der ermittelten und zusammengefassten Daten im Rahmen des Industrie- und Forschungsbeirates des Forschungsprojektes ELAB. Das generelle Vorgehen der Ermittlung des Personalbedarfs der Komponenten lässt sich damit wie folgt darstellen. Eine weitere Detaillierung einzelner Unterschiede für die Datenerhebung bei den konventionellen Komponenten sowie den neuen Komponenten erfolgt im Anschluss daran.

Definition der für das Projekt benötigter Daten und Datenermittlung

- Definition des generellen methodischen Vorgehens: Top-Down Datenerhebung des Personalbedarf über die Gesamtprozesse in Produktionsstätten sowie Bottom-

Up Datenerhebung basierend auf der Beschreibung der einzelnen Prozessschritte der Komponenten

- Definition der zu berücksichtigenden Inhalte: Fertigung und Montage von festgelegten Komponenten
- Definition einer einheitlichen Beschreibungssprache für die Aufnahme des Personalbedarfs: Diese erfolgt als direkte Mitarbeiter, produktionsnahe indirekte Mitarbeiter sowie indirekte Mitarbeiter
- Aufnahme des stückzahlabhängigen Personalbedarfs für die unterschiedlichen Komponenten. Insbesondere für die neuen Komponenten erfolgt eine Berücksichtigung einer niedrigen Stückzahl (für die Darstellung und Beschreibung einer niedrigen bis mittleren Automatisierung) sowie einer hohen Stückzahl (für die Darstellung und Beschreibung einer mittleren bis hohen Automatisierung)
- Die Festlegung der Stückzahlen erfolgte unter Berücksichtigung der notwendigen Stückzahlen für die ELAB-Szenarios sowie den Aussagen der Interviewpartner

Definition des Vorgehens und Methoden der Datenerhebung:

- Literaturrecherche
- Fragebögen an ausgewählte Experten (Papierform und digital)
- Werksbesuche und Besichtigungen von Produktionsstätten
- Expertengespräche und Interviews (Wissenschaft und Wirtschaft)

Bewertung und Zusammenführung der Daten:

- Interne Bewertung der geführten Interviews und erhobenen Daten
- Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Daten (ggf. Anpassung)
- Plausibilität der Aussagen (insbesondere bei Schätzungen)
- Verwendbarkeit im Rahmen des Projektes unter den gegebenen Einschränkungen
- Zusammenführung der gesammelten Daten unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Sorgfalt („Berücksichtigung aller vorliegender Sachverhalte“) sowie des Vorsichtsprinzips („minimal notwendiger Personalbedarf unter gegebenen Bedingungen“) und interner Bewertung („am wahrscheinlichsten“)
- Abschätzung und Ermittlung eines gewichteten Durchschnittswertes der ermittelten Zahlen

Optimierung und Validierung der Daten:

- Kontinuierliche Integration der Ergebnisse in den Prozessverlauf
- Workshops mit internen und externen Experten zur Validierung
- Delphi-Analyse zur weiteren Validierung
- Abschlussworkshop zur Validierung und Diskussion der zusammengefassten Ergebnisse und Feinjustierung
- Diskussion der Ergebnisse im Rahmen eines Forschungs- und Industriebeirates im ELAB-Projekt

5.1.1 Datenermittlung Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs

Die Datenermittlung bei den Komponenten der konventionellen Antriebsstränge ist durch eine große potentielle Datenmenge gekennzeichnet. Die Größe ergibt sich insbesondere aufgrund der Vielzahl an Produktionsstätten für die Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs sowie dessen lange Historie in der automobilen Großserienfertigung. Hieraus ergibt sich ebenfalls eine hohe Vielfältigkeit, Quantität sowie Qualität an Literatur und vorbereitender Forschungsarbeiten.

Für das Forschungsprojekt soll eine hohe Datenqualität durch das Ausnutzen hoch qualitativer Datensätzen erreicht werden. Hierzu werden im Forschungsprojekt sowohl Primärdaten als auch Sekundärdaten erhoben. Primärdaten sind bspw. direkte Interviews mit Experten der Aggregatewerke, Produktionsplaner etc. oder auch di-

rekte Besichtigungen und Aufnahme eigener Daten. Hingegen werden als Sekundärdaten bspw. Produktivitäts-Analysen von Beratungsgesellschaften (z.B. Harbour-Reports), Fachliteratur, Fachzeitschriften, eigene und fremde Forschungsergebnisse (erhoben als auch abgeschätzte oder berechnete Daten) bezeichnet. Beide Datenquellen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes aufgenommen und in die Analyse mit einbezogen.

Die Qualität der erhobenen Daten ist generell als gut anzusehen, da Daten abgefragt wurden, welche durch die aktuelle Produktion tatsächlich bei den Unternehmen vorliegen und nicht geschätzt werden müssen. Die befragten Unternehmen verfügten meist bereits durch eigene Analysen oder die Analysen Dritter über die notwendige und aufgeschlüsselte Datenbasis. Ebenfalls existiert sowohl bei den Unternehmen als auch den Forschungseinrichtungen eine Vielzahl an Vergleichswerten ähnlicher Produkte. Des Weiteren sind Auswirkungen, Probleme sowie Potentiale in der Produktion bekannt, beispielsweise bei einer Steigerung oder Reduktion der Produktionsmenge. Auch werden zumeist bekannte Produktionstechnologien eingesetzt, was eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse erleichtert. Anschließend an die Recherche der Daten wurden diese in einem internen Workshop zusammengeführt, bevor sie nochmals in einer Diskussion mit externen Experten validiert worden sind. Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Vorgehen und die methodischen Bausteine.



Abbildung 56: Visualisierung Sekundär- und Primärdatenrecherche „Konventionelle Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

5.1.2 Datenermittlung Komponenten des alternativen Antriebsstrangs

Um ebenfalls für die Komponenten der alternativen Antriebsstränge einen ausreichend validen Datensatz zu ermitteln, wurden ebenfalls hierbei Recherchen zu Primär- sowie Sekundärdaten durchgeführt. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass durch die bisher fehlende Produktion der Komponenten in der automobilen Großserie weniger Datenmaterial verfügbar war. Dies bezieht sich sowohl auf die Fertigungsstätten, als auch Erfahrung bei Experten und Firmen, sowie grundlegende Forschungsarbeiten und Berichte. Eine positive Ausnahme bildete hierbei insbesondere der Anlagenbau, welcher bereits fundierte Aussagen zu konkreten Fragestellungen rund um die Produktion als auch den Personalbedarf geben konnte. Die beschriebene Herausforderung wurde damit gelöst, dass ebenfalls eine Datenextrapolation erfolgte und auch Daten in Analogiefeldern aufgenommen und analysiert worden sind. Beide Vorgehensweisen werden im Anschluss weiter erläutert. Auf diese Weise konnten Expertenaussagen und Expertenabschätzungen aus weiteren Bereichen berücksichtigt und die Datenbasis damit gestärkt werden.

5.1.2.1 Extrapolation

Die „Extrapolation“ bezeichnet in der Definition des ELAB-Forschungsprojektes eine Aufnahme oder Abschätzung des Personalbedarfs einer Produktion im automobilen Bereich für niedrige Produktionsgrößen sowie dessen Übertragung auf eine höhere Stückzahl. Betrachtet wird ausschließlich derselbe Industriebereich: im Fall des Forschungsprojektes die Automobilindustrie (insbesondere Komponenten des neuen Antriebsstrangs).

Eine Extrapolation ist hilfreich und notwendig, wenn eine Firma noch keine automobilen Großserienproduktion für die relevanten Komponenten aufgesetzt hat, sondern lediglich im Automobilbau in Prototypen oder kleiner sowie mittlerer Seriengröße fertigt. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung war dies bei einer Vielzahl an Firmen der Fall. Zu berücksichtigen ist dabei das hohe abgefragte Produktionsvolumen von bis zu 500.000 Einheiten pro Jahr. Die Extrapolation erfolgte durch die interviewten Experten der teilnehmenden Firmen. Sie erfolgte sowohl auf Schätz- und Erfahrungswerten der interviewten Experten, als auch auf bereits im jeweiligen Unternehmen erarbeiteten Plänen zur Erhöhung des aktuellen Produktionsvolumens. Wenn zumeist auch noch nicht die entsprechenden Anlagen aufgebaut waren, war bei den interviewten Firmen dennoch schon vielfach explizites Know-how über die Möglichkeiten für und Notwendigkeiten bei einem Aufbau derartiger Produktionsanlagen vorhanden – auch in Verbindung mit dem damit verbundenen Personalbedarf.

Das Vorgehen der Datenerhebung für die Extrapolation ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Es erfolgte hierbei eine Identifikation und Recherche von interessanten Firmen aus dem Automobilbau (wie beispielsweise Continental, Getrag, Bosch oder auch Brusa) sowie relevanter Literatur und Veröffentlichungen. Nach der Identifikation und Kontaktierung der relevanten Firmen durch die Forschungspartner, wurden die notwendigen Unterlagen den Experten zur Verfügung gestellt und vorbereitet. Anschließend erfolgte die Erhebung der Daten in Form eines Interviews (meist persönlich, teilweise auch per Telefon oder E-Mail). Teilweise war auch eine Besichtigung und Analyse der Produktionsstätte möglich. Es wurden sowohl die tatsächlich vorliegenden Daten der Firmen aufgenommen, als auch eine Extrapolation der Daten zusammen mit den Experten durchgeführt. Alle weiteren ermittelten Daten wurden durch die Forschungspartner zusammengefasst und ebenfalls extrapoliert zur Validierung der Interviewergebnisse verwendet. Hierzu wurde ein stückzahlabhängiges Modell für die Produktion der definierten Komponenten aufgebaut und auf Basis der identifizierten Datenmaterialien der Personalbedarf für die relevanten Stückzahlen ermittelt.



Abbildung 57: Visualisierung Extrapolations-Recherche „Neue Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

5.1.2.2 Analogiefelder

Die „Recherche in Analogiefeldern“ bezeichnet in der Definition des ELAB-Projektes eine Aufnahme oder Abschätzung des Personalbedarfs einer Produktion ähnlicher Komponenten aus fremden Anwendungsbereich sowie dessen Übertragung in die automobiler Produktion (insbesondere Komponenten des neuen Antriebsstrangs). Betrachtet werden soll ein vergleichbarer Stückzahlbereich, um weitere Effekte möglichst auszuschließen.

Eine Recherche in Analogiefeldern ist hilfreich und notwendig, wenn eine Firma in vergleichbarer Stückzahl ähnliche Komponenten herstellt – beispielsweise für andere Anwendungen außerhalb der Automobilindustrie. Hierbei geht man von einer (bedingten) Übertragbarkeit des bisher gesammelten Know-hows bei der Produktion ähnlicher Komponenten. Aufgrund der Neuheit der Komponenten und der damit zusammenhängenden, ungeklärten Besetzung der Wertschöpfungskette, können sich gegebenenfalls auch neue, automobilfremde Firmen hier positionieren. Beispiele hierzu können sein: Hersteller von Komponenten sonstiger elektrische Antriebe (Bahn und ÖPNV), Flurförderfahrzeuge (Gabelstapler), Spezialanwendungen für Elektroantriebe (Militär), sonstige Elektronik (Photovoltaik Wechselrichter), Industrieanwendungen (Industriemotoren), aber auch Hersteller aus dem Automobilbau aus anderen Komponenten, wie beispielsweise elektrischer Starter-Generator, etc.

Das Vorgehen der Datenerhebung für die Recherche in Analogiefeldern ist ähnlich dem Vorgehen der Datenerhebung für die Extrapolation und in nachfolgender Abbildung dargestellt. Nach der Identifizierung von relevanten Firmen in den Analogiefeldern erfolgt die Datenerhebung sowie die Übertragung der vorliegenden Daten auf automobiler Prozesse. Dies wird sowohl durch externe Experten und Interviewpartner durchgeführt, als auch in Abschätzung der Forschungseinrichtungen.



Abbildung 58: Visualisierung Recherche in Analogiefeldern „Neue Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

5.1.2.3 Zusammenführung und Validierung

Die Extrapolation ermöglicht eine Ermittlung von Daten basierend auf dem aktuellen „Status-Quo“ der Fertigung von Komponenten des neuen Antriebsstrangs, welche auf die Großserie übertragen werden. Die Analogie-Betrachtung ermöglicht hingegen eine Ermittlung von Daten basierend auf dem aktuellen Status quo der Fertigung von ähnlichen Komponenten in der Großserie aus anderen Bereichen, welche auf den Automobilindustrie übertragen werden. Beide Betrachtungen erfolgen stückzahlbasiert für definierte Produktionszahlen. Die ermittelten Daten werden anschließend zusammengeführt und validiert.

Die Zusammenführung der gesammelten Daten erfolgte unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Sorgfalt („Berücksichtigung aller vorliegender Sachverhalte“), sowie des Vorsichtsprinzips („minimal notwendiger Personalbedarf unter gegebenen Bedingungen“), und einer internen Bewertung („am wahrscheinlichsten“) durch die Forschungsinstitute. Es erfolgte keine Berechnung oder Berücksichtigung eines mathematischen Durchschnittswerts der ermittelten Zahlen; hingegen wurde ein gewichteter Durchschnitt ermittelt.

Um eine höhere Güte der ermittelten Werte zu erreichen, wurde anschließend mit den zusammengeführten Werten eine Delphi-Studie durchgeführt. Hierzu wurde eine Auswahl der zuvor kontaktierten Experten angeschrieben und in den Prozess der Delphi-Studie eingebunden. Die ermittelten Rückmeldungen wurden erneut zusammengeführt und Gesamt-Validierung durch interne und externe Experten unterzogen. Das gesamte Vorgehen ist in nachfolgender Abbildung visuell dargestellt.

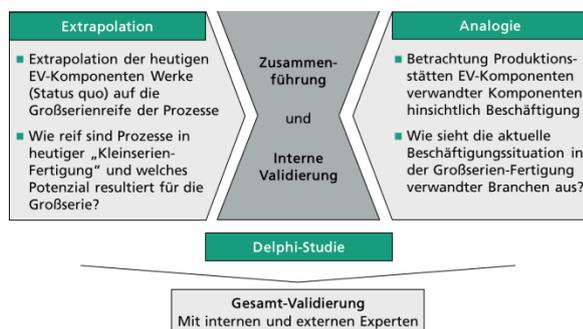


Abbildung 59: Visualisierung Zusammenführung und Validierung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Aufgrund dieses Vorgehens kann von einer hohen Güte des vorliegenden Datenmaterials ausgegangen werden. Dieses kann allerdings nur den aktuellen Stand zum Zeitpunkt der Befragung darstellen. Die Datenerhebung des Personalbedarfs erfolgte im Jahr 2011/12 und spiegelt den damaligen Stand der Forschung und Stand der Technik wieder. Zukünftige Entwicklungen (in Bezug auf Möglichkeit zur Produktion von Komponenten in automobile relevanter Stückzahl und Qualitätsanspruch) wurden durch die geführten Interviews integriert und soweit wie notwendig und möglich berücksichtigt. Technische Entwicklungen (sowohl am Produkt als auch an der Produktionstechnologie/-prozess), die zum Zeitpunkt der Datenerhebung nicht bekannt oder relevant waren, können hingegen nicht berücksichtigt werden. Eine Beschreibung der berücksichtigten Komponenten (und Bauteilanalysen) sowie die jeweiligen Produktionsprozesse und –Technologien sind bereits in vorherigen Kapiteln beschrieben worden. Eine Verallgemeinerung der ermittelten Zahlen oder Betrachtung dieser ohne Berücksichtigung der im Forschungsprojekt getätigten Annahmen und Restriktionen ist nicht möglich.

5.1.3 Interviewpartner

Zur Erhebung der Daten für das Forschungsprojekt wurde eine Vielzahl von relevanten Firmen identifiziert. Die Recherche bezog sich auch auf die Komponenten des konventionellen Antriebs, insbesondere aber auf die Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs. Hierzu wurde eine Liste von etwa 220 Firmen und den jeweiligen Ansprechpartner erstellt und analysiert. Es erfolgte eine Auswahl einer Gruppe an interessanten Ansprechpartnern und Experten in den jeweiligen Firmen, welche

durch die Forschungspartner kontaktiert wurden. Eine Auswahl der kontaktierten Firmen ist differenziert nach den Bereichen Komponenten des konventionellen sowie neuen Antriebsstrangs in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Im Zuge der Kontaktierung der Experten wurden den Firmen eine Beschreibung zum Projekt ELAB sowie Darstellung einer möglichen Mitwirkung und der benötigten Informationen zugesendet. Darüber hinaus erhielten Interessenten im zweiten Schritt nach einer positiven Rückmeldung die Prozessbeschreibungen zur Fertigung der betrachteten Komponenten, als auch eine Beschreibung und Vorlage zur Ermittlung des jeweiligen Personalbedarfs, sowie die Darstellung und Auflistung relevanter Definitionen und Annahmen. Die Prozessbeschreibungen wurden im Rahmen der Interviews mit den Interviewpartnern validiert und eventuelle Abweichungen aufgezeigt und diskutiert. Ebenfalls wurden die Prozessbeschreibungen auch als Basis für die Ermittlung des jeweiligen Personalbedarfs herangezogen. Der Personalbedarf wurde für die definierten Stückzahlbereiche sowie entsprechend dem Personalmodell des Forschungsprojektes aufgenommen.



Abbildung 60: Kontaktierte Firmen für Datenerhebung „Konventionellen Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

Anstelle eines großskaligen sowie undefinierten Anschreibens möglicher Interessenten, erfolgten die Interviews mit ausgesuchten Experten in einem geschlossenen Kreis. Die Anzahl an positiven Rückmeldungen und geführten Interviews (bzw. Besichtigungen oder Datensätzen aus Gesprächen und Interviews) lag etwa bei 40. Je nach Komponente ergaben sich etwa 5 bis 10 Datensätzen. Hinzu kommen noch Datensätze aus Sekundärdatenrecherche (beispielsweise Veröffentlichungen der Firmen, Veröffentlichungen dritter, Datenbanken, sonstige Literatur, etc.). Die Interviewpartner waren vor allem aus den Bereichen Leitung der Fertigung oder Produktion, ggf. auch Personal und Geschäftsleitung, oder Leitung des jeweiligen Geschäftsfelds oder Geschäftsstelle/Business Unit.

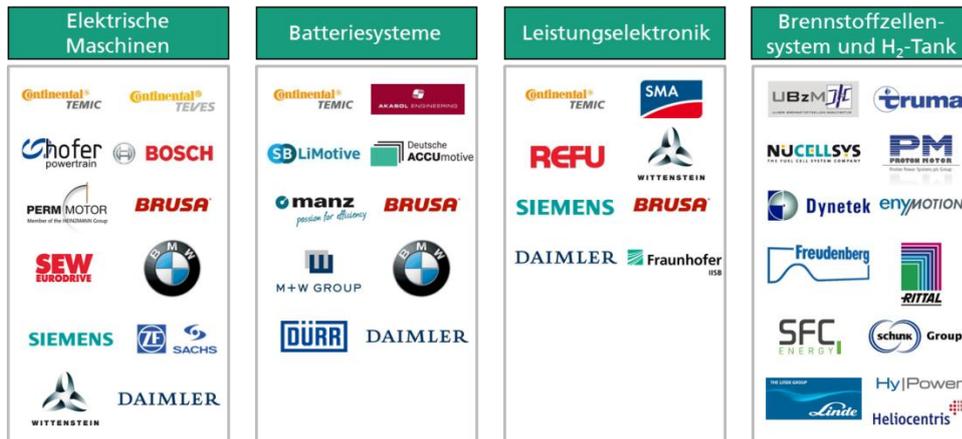


Abbildung 61: Auswahl kontaktierter Firmen für Datenerhebung "Neue Komponenten" (Grafik: Fraunhofer IAO)

Kritisch ist generell die Geheimhaltung der notwendigen Daten bei den befragten Unternehmen, beziehungsweise damit verbunden die Herausgabe und Verwendung der Daten für das Forschungsprojekt. Dies gilt allerdings gleichermaßen für die Komponenten des konventionellen als auch neuen Antriebsstrangs. Im Forschungsprojekt wurden den teilnehmenden Unternehmen absolute Anonymität zugesichert. Es erfolgt daher auch keine Veröffentlichung von Beispieldatensätzen oder Aussagen zu den Rückmeldung und Aussagen einzelner Firmen.

5.2 Definitionen

Im Rahmen der Personalbedarfsermittlung für das ELAB-Forschungsprojekt wurden Definitionen getroffen, die sich teilweise in gleicher oder ähnlicher Form auch in der Literatur wiederfinden. Allerdings kann es bei einzelnen Punkten eine Divergenz zum alltäglichen Gebrauch von Begriffen geben, oder Begriffe sind ausschließlich für den Bedarf und die Notwendigkeiten des Forschungsprojektes definiert worden. Daher soll in diesem Kapitel ein Überblick über die verwendeten Begrifflichkeiten bei der Ermittlung und Darstellung des Personalbedarfs gegeben werden.

5.2.1 Personalbedarf (Bruttobedarf, Nettobedarf)

Im ELAB-Projekt wird zwischen dem Brutto- und Netto-Personalbedarf unterschieden.

Der **Netto-Bedarf** betrachtet hierbei das theoretisch mindestens notwendige Personal, um die geplante Produktion in einem bestimmten Zeitraum fahren zu können. Dabei wird angenommen, dass die Arbeitszeit genau der Schichtdauer entspricht, Mitarbeiter nicht erkranken, keinen Urlaub haben und sich auch keine sonstigen Zeitausfälle ergeben. Die Befragungen wurden als Netto-Erhebung durchgeführt (oder ggf. auf eine solche umgerechnet). Ausschlaggebend hierfür war die prozessseitige Betrachtung des Personalbedarfs der Interviewpartner. Der nachfolgend dargestellte Personalbedarf für die Komponenten über die Stückzahl entspricht ebenfalls einem Netto-Bedarf.

Der **Brutto-Bedarf** betrachtet das praktisch notwendige Personal, um die geplante Produktion fahren zu können. Dies erfolgt in Hinblick auf kurz-, mittel- und langfristige Produktions- und Absatztrends. Es wird ein Mehraufwand durch Urlaubstage, Krankheit, Schulungen und sonstige Zeitausfälle unterstellt. Außerdem geht der

Brutto-Bedarf nicht von einer zeitlichen Kongruenz der Schichtdauer und Arbeitszeit aus, d.h. der Brutto-Bedarf deckt auch Unterschiede der IRWAZ (Individuelle regelmäßige wöchentliche Arbeitszeit) auf die Schichtzeit ab. Dies gilt auch für Wochenendarbeiten. Der Brutto-Bedarf setzt sich damit zusammen aus dem Netto-Bedarf sowie einem Overhead zur Deckung des anfallenden Mehraufwands. Die Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion, wie diese im nächsten Hauptkapitel durchgeführt wird, betrachtet die Gesamtauswirkungen des Personalbedarfs und erfolgt daher als Brutto-Ausweis.

Mittels eines Umrechnungsfaktors kann der Personalbedarf von Netto auf Brutto umgerechnet werden. Dies gilt selbstverständlich auch für die Umrechnung von Brutto auf Netto Werte. Beispielhaft ergibt sich bei einer vertraglichen 35h-Woche sowie einer regulären 40h-Schicht (Mehraufwand von 14%) sowie 15% zusätzlicher Schichtverlängerung oder Wochenendarbeit und 5% Krankheit und ohne Berücksichtigung weiterer Abwesenheit ein Umrechnungsfaktor Netto auf Brutto von 1,34 (entspricht einer Aufwertung von 34%). Ein derartiger Umrechnungsfaktor ist werksabhängig, aber auch abhängig von dem Produktionsstandort sowie vorliegenden tarifvertraglichen Vereinbarungen.

Netto-Personalbedarf	Brutto-Personalbedarf
Abgeleitet aus „Netto-Stunden“	Abgeleitet aus „Brutto-Stunden“
Praktisch benötigtes Personal	Tatsächlich notwendiges Personal,
Bspw. Anzahl direkter Mitarbeiter an den Linien in einer Produktionseinheit In Vollzeitäquivalenten (FTE)	Bspw. Gesamtanzahl direkter Mitarbeiter auf der Lohnliste in einer Produktionseinheit
Annahmen: Arbeitszeit entspricht Schichtdauer, keine Krankheit, kein Urlaub etc.	In Vollzeitäquivalenten (FTE) Netto-Personalbedarf + Overhead Overhead als Puffer für Urlaubstage, Krankheit, Feiertage, sonstige Fehlzeiten, Qualifizierung, Ausgleich Überstunden bei 40h-Wochen (mit 35h-Verträgen) oder Wochenend-Arbeit etc.

Tabelle 7: Unterschiede Brutto-/Netto-Personalbedarf

5.2.2 Beschreibungssprache Mitarbeiter

Zur differenzierten Betrachtung von Beschäftigungswirkungen wurde im Rahmen des ELAB Projektes eine Beschreibungssprache zur Gruppierung der betrachteten Mitarbeiter entwickelt. Dabei sind die Mitarbeiter (MA) in „direkte Mitarbeiter“, „produktionsnahe indirekte Mitarbeiter“ und „indirekte Mitarbeiter“ unterteilt. Es sei nochmals darauf verwiesen, dass die Ermittlung des Personalbedarfs– wie das gesamte Forschungsprojekt – auf den Bereich der Produktion fokussiert. Änderungen im Personalbedarf in der Forschung und Entwicklung oder sonstigen Bereichen wie Verwaltung, etc. wurde nicht aufgenommen oder analysiert.

Direkte Mitarbeiter sind Lohnarbeiter, die direkt an der Produktion beteiligt sind. Ihre Aufgaben sind direkt dem Produktionsfortschritt zuordenbar. Beispiele hierfür sind nahezu alle Tätigkeiten der direkten Fertigung und Montage wie Drehen, Fräsen, Montieren. Auch fallen hierzu Tätigkeiten wie das Prüfen (am Produkt) oder Einrichten der Maschine sowie die Wartung der Maschine (solange es sich um eine vorbeugende Maßnahme der Instandhaltung handelt). Die Abhängigkeit des Personalbedarfs der direkten Mitarbeiter vom Produktionsvolumen ist nach Annahme des ELAB Projektes linear stückzahlabhängig. Dies bezieht sich sowohl auf Linien- als auch Schichtenanzahl der Produktion. Eine weitere Detaillierung dieser Annahmen erfolgt im nächsten Hauptkapitel.

Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter sind Mitarbeiter, die zwar an der Produktion beteiligt sind, jedoch nicht direkt. Das heißt sie sind nicht direkt mit den Tätigkeiten der Fertigung oder Montage beschäftigt. Ihre Aufgaben sind daher dem Produktionsfortschritt nur mittelbar zuordenbar. Beispiele hierfür sind die Logistik und Transport, die Instandhaltung und Instandsetzung sowie die Qualitätssicherung. Die Steigung des Personalbedarfs an produktionsnahen indirekten Mitarbeitern ist insgesamt degressiv zum Produktionsvolumen, da mit wachsender Anzahl der Linien Degressionseffekte auftreten.

Indirekte Mitarbeiter planen die Produktion, sie sind jedoch nicht direkt an ihr beteiligt. Ihre Aufgaben sind nur indirekt dem Produktionsfortschritt zuordenbar, auch dann, wenn sie im Produktionsbereich angesiedelt sind. Zu den Beispielen hierfür zählen insbesondere Meister und Planer. Gegebenenfalls sind hierzu auch Mitarbeiter des Engineering, sonstiger Verwaltung oder sonstiger Datenerfassung zu zählen.

5.2.3 Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil

Produktionen sind hinsichtlich der zugekauften oder selbst produzierten Komponenten und Systeme teils sehr unterschiedlich ausgerichtet. Bei Vergleich unterschiedlicher Produktionen, können sich je nach Anteil der Eigenfertigung sehr große Unterschiede der quantitativen Beschäftigungseffekte ergeben. Für die Komponenten des konventionellen sowie des neuen Antriebsstrangs wurden daher jeweils ein spezifischer „wertmäßiger Eigenfertigungsanteil“ für die idealtypische Antriebsstrangproduktion definiert. Die Berücksichtigung eines wertmäßigen Eigenfertigungsanteils ermöglicht es, die Aussagen der befragten Experten aus unterschiedlichen Unternehmen (und damit meist unterschiedlichen Eigenfertigungen) zusammenzuführen.

Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil beschreibt den wertmäßigen Anteil der Eigenfertigung an der Gesamtfertigung ohne Einbeziehung von Rohstoffen und Halbzeugen. Hierdurch wird versucht entsprechende Hintergrundinformationen mit in die Analyse zu integrieren, um sowohl die Zusammenführung unterschiedlicher Datenmaterialien (beispielsweise unterschiedlicher Produktionen hinsichtlich einer Komponente) zu vereinfachen, als auch einen validen Vergleich unterschiedlicher Komponenten zu ermöglichen.

$$\begin{array}{c} \text{Wertmäßiger} \\ \text{Eigenfertigungs-} \\ \text{anteil [\%]} \end{array} = \frac{\text{Eigenfertigung} \times 100}{\text{Gesamte} \\ \text{Komponentenfertigung}} = \frac{\text{Eigenfertigung} \times 100}{\text{Eigenfertigung} + \text{Fremdbezug (ohne Bezug Rohstoffe, Halbzeuge, Norm-Teile)}}$$

Abbildung 62: Definition "Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil" (Grafik: Fraunhofer IAO)

Ein wertmäßiger Eigenfertigungsanteil von 100 % bedeutet hierbei, dass das Unternehmen ohne Zukauf relevanter Komponenten in hoher Unabhängigkeit Produkte herstellt, z. B. wenn in einem Unternehmen alle Make-or-Buy Entscheidungen positiv für die eigene Fertigung getroffen worden sind und damit die gesamte Wertschöpfung über die produzierbaren Komponenten und (Sub-)Systeme abgebildet ist. Ein wertmäßiger Eigenfertigungsanteil von 0 % bedeutet hingegen, dass das Unternehmen weder eine eigene Produktion oder Montage noch die Veredelung von Produkten durchführt, sondern sich allein auf deren Handel beschränkt.

Der Bezug von Normteilen, Rohstoffen und Halbzeugen (wie bspw. DIN-Schrauben, Stahl, Coils, Rohre, etc.) soll nicht berücksichtigt werden, da das Forschungsprojekt auf eine idealtypische Antriebsstrangproduktion zielt. Das heißt, ELAB ist fokussiert auf die Komponenten, welche in idealtypischen Produktionswerken im Automobilbau generell gefertigt werden.

Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil ist bezogen auf Kosten - nicht auf Zeiten, oder Prozessschritte. Er stellt damit keine direkte Korrelation zur Größe „Personalbedarf“ dar. Er kann allerdings trotzdem Verwendung finden, um die ermittelten Personalbedarfe bei den Komponentenherstellern weiter zu beschreiben und einer Vergleichbarkeit zugänglich zu machen.

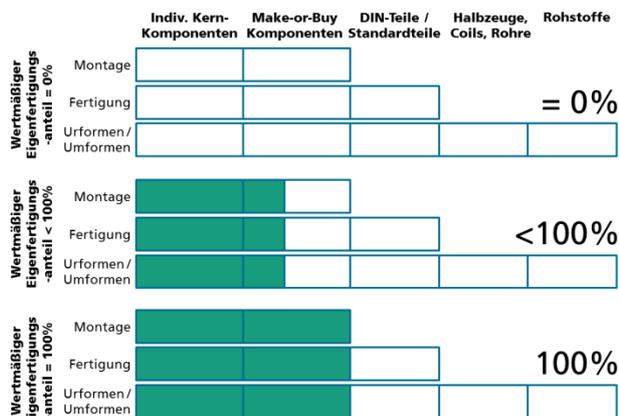


Abbildung 63: Visuelle Darstellung verschiedener „Wertmäßiger Eigenfertigungsanteile (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die Fokussierung von ELAB erfolgt auf die Produktion und Fertigung ausgewählter Komponenten, sowohl für konventionelle als auch alternative Antriebsstränge. Es erfolgt keine fokussierte Betrachtung von zugekauften Komponenten im Rahmen des Projektes, weder durch die Betrachtung von Produktionsprozessen, noch in Bezug auf deren Wirkungen auf den Personalbedarf. Daher sind die nicht eigenerstellten Komponenten durch die Definition des wertmäßigen Eigenfertigungsanteils für die Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion auszuschließen. Die Definition der in einer idealtypischen Produktion gefertigten Komponenten und Subkomponenten wird im Kapitel der Bauteileanalyse beschrieben. Dies liefert die Grundlage für die Festlegung der zu berücksichtigenden Komponenten für die Ermittlung des wertmäßigen Eigenfertigungsanteils.

Eine Rückrechnung auf personelle, quantitative Effekte bei Zulieferern ist durch den Ansatz und die Definition des wertmäßigen Eigenfertigungsanteils allerdings nicht möglich. Auswirkungen bei Zulieferern stellen nicht den Fokus dieses Forschungsprojektes dar. Sie können aber mit derselben Systematik und aufbauend auf den im Rahmen von ELAB analysierten Grundlagen erarbeitet werden. Dies ist insbesondere

daher zu erwähnen, da das entwickelte Analysetool zur Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion dies technisch umsetzen kann, allerdings die hinterlegte Datenstruktur ausschließlich die definierten eigengefertigten Komponenten beschreibt.

Die Höhe des jeweiligen Personalbedarfs einer produzierten Komponente wurde unter anderem durch Experteninterviews ermittelt. Hierbei wurde ermittelt, welcher Personalbedarf in einer Komponentenproduktion besteht, unter Berücksichtigung des jeweiligen in dem Unternehmen vorliegenden wertmäßigen Eigenfertigungsanteils. Es erfolgte gegebenenfalls eine Anpassung der durch die Interviews ermittelten Zahlen bei einem Abweichen der dort eigenerstellten Komponenten von den Annahmen bezüglich einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion.

Die angenommene Höhe des jeweiligen wertmäßigen Eigenfertigungsanteils der Komponenten basiert auf den Einschätzungen von Experten hinsichtlich plausibler wertmäßiger Anteile zur Herstellung der jeweiligen Komponenten innerhalb einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion. Die getroffene Festlegung wird hierbei als idealtypisch angenommen und wurde von den Forschern festgelegt.

Zu beachten ist, dass der gewählte wertmäßige Eigenfertigungsanteil (und auch die in der Bauteileanalyse als Eigenfertigung beschriebenen Komponenten) keine Empfehlung für die Gestaltung zukünftiger Produktionen darstellt, sondern nur eine im Rahmen des Projektes festgelegte Annahme einer möglichen Ausprägung. Das Forschungsprojekt ELAB beinhaltet keine Berücksichtigung, Analyse oder Empfehlung von Make-or-Buy Entscheidungen – weder für Gesamtsysteme noch für Komponenten. Ebenfalls gilt in der bei ELAB betrachteten idealtypischen Antriebsstrangproduktion die Annahme eines gleichbleibenden wertmäßigen Eigenfertigungsanteils für alle Komponenten. Dies gilt sowohl für den definierten wertmäßigen Eigenfertigungsanteil der Komponenten des konventionellen Antriebsstrangs als auch für die Komponenten der alternativen Antriebsstränge.

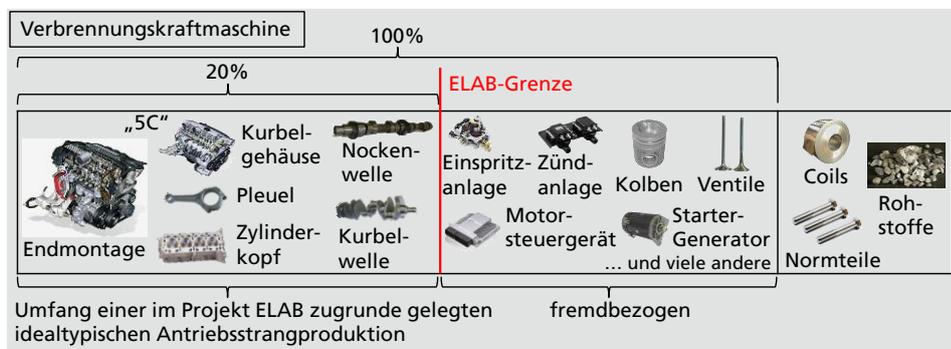


Abbildung 64: Darstellung des wertmäßigen Eigenfertigungsanteils und dessen Zusammensetzung sowie der ELAB-Eingrenzung am Beispiel VKM (Grafik: Fraunhofer IAO)

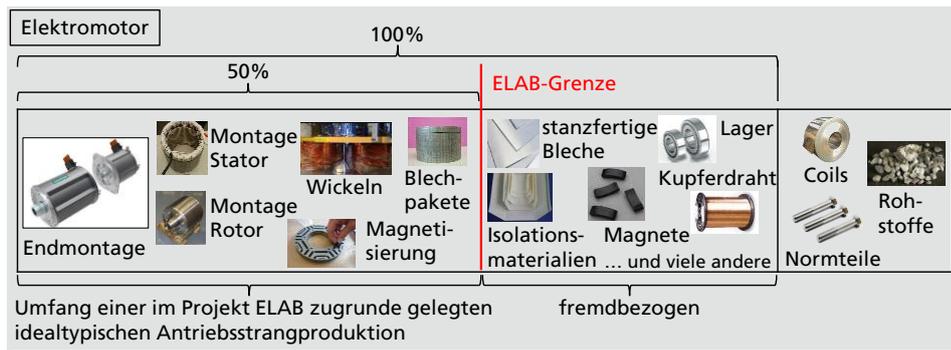


Abbildung 65: Darstellung des wertmäßigen Eigenfertigungsanteils und dessen Zusammensetzung sowie der ELAB-Eingrenzung am Beispiel Elektromotor (Grafik: Fraunhofer IAO)

5.3 Randbedingungen und Einschränkungen der Datenbasis

Die Personalbedarfsermittlung im Rahmen des ELAB Forschungsprojektes unterliegt einer Anzahl an Randbedingungen und Einschränkungen. Diese sind grundlegend für das Verständnis und Interpretation der erhaltenen Ergebnisse notwendig. Die methodische und wissenschaftliche Vorgehensweise wurde bereits zuvor erklärt. Hieraus leiten sich die ersten Einschränkungen ab, welche auch bereits im Text aufgezeigt worden sind. Zur Vollständigkeit sollen nachfolgend weitere Punkte detaillierter beschrieben und ein Gesamtüberblick gegeben werden.

5.3.1 Datengüte

5.3.1.1 Datenermittlung allgemein

Die Interviews erfolgten mit ausgesuchten Experten in einem geschlossenen Kreis. Sie sind bewusst nicht großskalig und anonym angelegt worden. Vorteilhaft erweist sich hierbei allerdings die Spezifizierung der Antworten, sowie der persönliche Kontakt und Austausch mit den Experten. Auf dieser Basis kann auch eine valide Bewertung der erhaltenen Ergebnisse durch die Forschungseinrichtungen erfolgen. Aus einer Liste von etwa 220 Firmen erfolgte die Auswahl einer Gruppe an Experten, die kontaktiert wurden. Die Anzahl an Rückmeldungen und geführten Interviews (bzw. Besichtigungen oder Datensätzen aus Gesprächen und Interviews) lag etwa bei 40. Aufgrund der Vielzahl an untersuchten Komponenten, resultieren daraus etwa 5 bis 10 Datensätze pro Komponente. Teilweise bestehende Vorkontakte zu den Firmen begünstigten das Antwortverhalten der angeschriebenen Experten und Firmen. Allerdings war die Möglichkeit der Firmen zur Beantwortung der Forschungsfragen teilweise schwierig oder unmöglich. Dies lag zum einen an nicht vorhandenem Wissen bezüglich der untersuchten Punkte und aktuell fehlende Produktionen. Zum anderen war aber auch das Thema der Geheimhaltung von wettbewerbsrelevanten Faktoren maßgebend für eine Ablehnung.

5.3.1.2 Extrapolation und Analogie-Betrachtung

Eine Einschränkung in der Datengüte kann sich auch durch das methodische Vorgehen der Extrapolation sowie Recherche in den Analogiefeldern ergeben. Zum Zeitpunkt der Datenerhebung gab es kaum tatsächlich bestehende Produktionsanlagen, auf welchen in der Qualität und Quantität der automobilen Großserie Komponenten

des neuen Antriebsstrangs gefertigt wurden. Daher mussten die benötigten Daten zum Großteil abgeschätzt werden. Die Abschätzung erfolgte durch Annäherung über eine Extrapolation aktueller automobiler Produktionen sowie über die Betrachtung von Analogiefeldern ähnlicher Komponenten. Eine derartige Abschätzung ist für beide Bereiche allerdings schwierig und mit Unsicherheitsfaktoren belastet. Für eine Extrapolation auf eine Serienfertigung ist es insbesondere schwierig, dass hierbei meistens neue Produktionsprozesse sowie Produktionstechnologien eingesetzt werden. Auch stellen sich höhere Anforderungen an die Qualität der Produkte. Vielfach ist dies direkt auch mit einem neuen Produktdesign verbunden, welches spezifisch auf die automobilen Großserienfertigung ausgelegt wird. Die Analogiebetrachtung von ähnlichen Produkten erweist sich ebenfalls als schwierig, da die Qualitäts- sowie Kostenanforderungen der automobilen Großserie kaum in anderen Bereichen vorliegen. Dies führt ebenfalls zu einer hohen Komplexität beim Übertragen von Ergebnissen. Durch die automobilen Anforderungen sind vielfach auch nur spezielle Produktkonzepte erfolgreich einzusetzen. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, wurden die Experten in die Erarbeitung der entsprechenden Übertragungen und Extrapolationen eingebunden. Des Weiteren wurden neben den Experteninterviews auch weitere Daten aus Sekundärdatenrecherchen berücksichtigt.

5.3.1.3 Zusammenführung und Optimierung der Zahlen

Die Zusammenführung der gesammelten Daten erfolgte unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Sorgfalt („Berücksichtigung aller vorliegender Sachverhalte“) sowie des Vorsichtsprinzips („minimal notwendiger Personalbedarf unter gegebenen Bedingungen“) und einer internen Bewertung („am wahrscheinlichsten“) durch die Forschungsinstitute. Aufgrund des direkten Austausches mit den Interviewpartnern war es den Forschungseinrichtungen möglich, einen gewichteten Durchschnitt zu ermitteln. Zur weiteren Optimierung der Ergebnishüte wurden weitere Schritte durchgeführt, um die Ergebnishüte zu optimieren sowie zu validieren. Zu nennen ist hierbei insbesondere eine Delphi-Befragung mit einer Auswahl an Experten über die zusammengeführten Zahlen der jeweiligen Komponenten.

5.3.1.4 Aktueller Stand der Technik bei Komponenten und in Produktion

Die Datenerhebung zum Personalbedarf erfolgte im Jahr 2011/12 und spiegelt den damaligen Stand der Technik wieder. Dies bezieht sich sowohl auf das Produktdesign als auch auf die Produktionstechnologien. Zukünftige Entwicklungen in Bezug auf Möglichkeiten zur Produktion von Komponenten in automobiler relevanten Stückzahl und Qualitätsanspruch wurden durch die geführten Interviews integriert und soweit wie möglich berücksichtigt. Technische Entwicklungen sowohl am Produkt als auch an der Produktionstechnologie/-prozess, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung nicht bekannt oder relevant waren, können hingegen nicht berücksichtigt werden.

5.3.1.5 Abweichungen vom idealtypischen Personalbedarf

Die veröffentlichten Daten stellen in keinem Fall (auch aufgrund der Zusicherung der Anonymität der am Forschungsprojekt beteiligten Partner) die direkten Aussagen einzelner Firmen dar, sondern sind als Zusammenfassung verschiedener Datenmaterialien sowie als Abschätzung der Forschungseinrichtungen zu interpretieren. Daher sind Abweichungen im Personalbedarf produzierender Unternehmen unausweichlich und auch vorliegend. Ebenfalls müssen die angegebenen Werte als idealtypisch unter den gesamten Annahmen und Restriktionen des Forschungsprojektes gesehen werden. Eine Verallgemeinerung der ermittelten Daten oder Verwendung der Daten bezüglich direkt abgeleiteter Aussagen für eine bestimmte Firma oder eine real existierende Aggregateproduktion ist daher nicht möglich.

5.3.2 Berücksichtigung Erfahrungskurveneffekte und Produktkomplexität

5.3.2.1 Lernkurveneffekte

Der Lernkurveneffekt hat als Basis die Annahmen, dass jeder Mitarbeiter durch jede weitere hergestellte Produkteinheit lernt und seine Arbeit effizienter verrichtet (Schulz, 1988, S. 142). Er führt daher dazu, dass mit zunehmender Ausbringung die Arbeitskosten sinken. Vor allem Übungseffekte des operativen Produktionspersonals und organisatorische Verbesserungen führen zumeist zu einer arithmetisch- oder geometrisch-degressiven funktionalen Beziehung. Die Lernkurve beschreibt den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Wiederholung eines Produktionsprozesses und dem Input-/Output-Verhältnis dieses Prozesses (Wirtschaftslexikon Gabler, 2012). Die Wahl eines Lernkurven-Modells ist generell abhängig von verschiedenen Kontextfaktoren, wie beispielsweise dem Produkt selbst. Aber auch eine Vielzahl weiterer Faktoren muss hierbei berücksichtigt werden, wie Seriengröße, Herstellungsverfahren, Automatisierungsgrad, Flexibilität- oder Wandlungsfähigkeit.

5.3.2.2 Erfahrungskurveneffekte

Bei der Erfahrungskurve handelt es sich um ein Konzept, das einen Zusammenhang zwischen Kostenentwicklung und Produktionsmenge aufzeigt. Das Modell stellt im Wesentlichen eine Erweiterung der Lernkurve dar. Es wurde festgestellt, dass mit zunehmender Erfahrung nicht nur die Fertigungskosten, sondern alle anderen Kosten, wie zum Beispiel Vertriebskosten, Forschungs- und Entwicklungskosten, Personalkosten und Materialkosten, sinken (Henderson, 1984, S. 15 ff). Im Vergleich zur Lernkurve stellt die Erfahrungskurve eine Generalisierung dar. Diese besagt, dass man davon ausgehen kann, dass die Stückkosten im Laufe der Zeit durch zusätzliche Erfahrung sinken (Thommen & Achleitner, 2001). Die Erfahrungskurve zeigt lediglich Einsparungspotentiale auf, die durch entsprechende Maßnahmen des Managements realisiert werden können (Henderson, 1984, S. 19) (Gälweiler, 1986, S. 258). Die Einzelursachen, die hierzu beitragen, können grundlegend in zwei Hauptkategorien zusammengefasst werden (ajv-bintelligence, 2012):

- Dynamischer Effekt: Lerneffekt (Übungsgewinn aufgrund wiederholender Arbeitstätigkeit), Effizienzsteigerung durch fortschreitende qualitative Verfahrenstechniken/Produktqualität (Wertanalyse, Standardisierung, Kanban etc.), Effizienzsteigerung durch Automatisierung und Rationalisierung (Produktivitätssteigerung, technischer Fortschritt etc.).
- Statischer Effekt: Hierbei sind Fixkostendegression, Betriebsgrößendegression (Skaleneffekte, Verbundeffekte) und von der Ausstoßmenge abhängige Übergänge zu kostengünstigeren Produktionstechnologien (zum Beispiel von Werkstatt- zu Fließfertigung) zu betrachten.

5.3.2.3 Steigerung Produktkomplexität

Für die szenarische Analyse des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion, wie diese im nächsten Hauptkapitel durchgeführt wird, ist zu beachten, dass zeitliche Effekte zu einer Veränderung der Komplexität der betrachteten Produkte führen können. Eine veränderte Komplexität der Produkte würde zu einer Veränderung im Personalbedarf führen und müsste demzufolge bereits bei der Erhebung des Personalbedarfs berücksichtigt werden.

Komplexität wird generell verstanden als eine große Anzahl von Elementen und Zuständen, die untereinander in einer Vielzahl von Beziehungen stehen, sehr verschiedenartig sind und deren Anzahl und Verschiedenartigkeit zeitlichen Schwankungen unterworfen sind (Maune, 2001, S. 1, nach Luhmann, 1991, S. 45 ff.). Ge-

nerell ist im Automobilbau von einer stetigen Steigerung der Unternehmens- und auch Produktkomplexität auszugehen. Hierzu trägt eine Vielzahl unterschiedlicher Ursachen bei (Maune, 2001, S.1, nach Wildemann, 1995, S.21).

Allgemeine Auswirkungen auf die Unternehmens- und Produktkomplexität ergeben sich beispielsweise durch Variantenvielfalt, Outsourcing, Internationalisierung, Nachfragemarkt, kürzere Produktlebenszyklen, nicht-verursachungsgerechte Kostenzurechnungen, Informationsdefizit, Zeitdruck, länderspezifische Vorgaben etc. Aber auch gesetzliche Anforderungen beispielsweise bezüglich Sicherheit oder Umwelt müssen berücksichtigt werden. Diese können sowohl die Anforderungen an umweltfreundliche Produkte erhöhen als auch an Produktionsprozesse. Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich durch sonstige gesteigerte Anforderungen, wie Optimierung des Produktes hinsichtlich unterschiedlicher Dimensionen (bspw. Leistung, Verbrauch, oder auch Kosten und Bauraum). Diese können direkte auf die Produktkomplexität wirken. Neue, erweiterte Produkthanforderungen müssen in technische Größen übersetzt werden. Dabei kann durch Auswahl des Produktkonzepts und der Produktionstechnologien die Produktkomplexität stark beeinflusst werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das gewählte Produktkonzept vielfach selbst auch die benötigte Produktionstechnologie beeinflusst. Die Steigerung der Produktkomplexität führt damit beispielsweise indirekt zu zusätzlichen notwendigen Komponenten und Systemen oder höhere Qualitätsanforderungen bei der Fertigungstechnologie, neuen Materialien, neuen Fertigungsprozessen, etc.

Am Beispiel des Verbrennungsmotors soll der Sachverhalt exemplarisch beschrieben werden: Hierbei ergibt sich eine stetig steigende Produktkomplexität durch gesetzliche Anforderungen (weniger CO₂-Belastung) oder Marktanforderungen (mehr Leistung), aber auch begründet durch weitere Varianten. Maßnahmen und Ansätze zum Heben dieses Potenzials finden sich in unterschiedlichen Bereichen. Aktuelle technologische Entwicklungslinien des Verbrennungsmotors lassen sich nachfolgend zusammenfassen (Spath, et al., 2011). Die Komplexität der Verbrennungsmotorsysteme und auch die Kosten für die Module, sowie der Fertigungs- und Montageaufwand werden durch diese Optimierungsmaßnahmen allerdings auch steigen und wirken hierbei auch auf den Personalbedarf.

- Downsizing mit teilweise mehrfacher Aufladung über Turbolader oder mechanischen Lader (Kompressor)
- Downsizing über Reduktion der Zylinderanzahl
- Benzindirekteinspritzung
- Reduzierung der Motorreibung
- Variabler Ventiltrieb (VVTL: Variable Valve Timing and Lift)
- Zylinderdeaktivierung
- Start-Stopp-System
- Sonstige Verfahren: Combined Combustion (Diesotto), HCCI, CAI
- Sonstige CO₂-Optimierungen: Elektronik, Abgasrückführung, optimierter Kühlkreislauf

5.3.2.4 Berücksichtigung von Erfahrungskurveneffekt sowie Komplexitätssteigerung

Erfahrungskurveneffekt und Lernkurveneffekt sind wie oben gezeigt nicht miteinander gleichzusetzen. Die Erkenntnisse allerdings, welche aus Lernkurven gewonnen werden, fließen direkt in Erfahrungskurven ein (Betriebswirtschaft Info, 2012). Die Lerneffekte erklären dort auch einen erheblichen Teil der Erfahrungskurven (Wirtschaftslexikon Gabler, 2012). Als weiterer Unterschied bezieht sich die Lernkurve auf Erfahrungen, welche im Fertigungsbereich gesammelt werden, wobei die

Erfahrungskurve eher das ganze Unternehmen mit einbezieht (Betriebswirtschaft Info, 2012).

Bei der Berücksichtigung der beiden Effekte ist der Fokus des Forschungsprojektes zu beachten, welches sich auf die Produktion bezieht. Um ausschließlich die darauf wirkenden Effekte zu berücksichtigen, ist eine separierte Analyse und Berücksichtigung der oben beschriebenen Einzelursachen notwendig. Weiterhin ist zu beachten, dass einige dieser Effekte bereits über die stückzahlbezogene Erhebung und Abschätzung des jeweiligen Personalbedarfs der Komponenten mit berücksichtigt sind. Darüber hinaus zeigt die Praxis des Automobilbaus eine weitgehende Kompensation der Effekte aus den Erfahrungs- und Lernkurven, welche eigentlich den Personalbedarf reduzieren, durch Effekte der Steigerung der Komponentenkomplexität, welche die Fertigungszeiten oder auch den Personalbedarf erhöhen.

Insbesondere bei den konventionellen Komponenten ist daher davon auszugehen, dass die auf den Produktionsprozess bezogenen Erfahrungskurveneffekte sowie die Komplexitätssteigerung über die nächsten Jahre annähernd gleichbleibend sind und sich auslöschend überlagern. Daher erfolgt die Annahme für die nachfolgende Szenario-basierte Analyse der Beschäftigungseffekte, dass sich beide Einflussfaktoren zeitlich gesehen gegenseitig aufheben und nicht direkt dargestellt werden. Für die neuen Komponenten ist davon auszugehen, dass mögliche Erfahrungskurveneffekte in den ermittelten und geschätzten Angaben zum Personalbedarf über die Stückzahlen integriert sind. Die Berücksichtigung von Komplexitätseffekten wird durch die genaue Definition der zukünftigen Ausprägung der Komponenten als sehr gering angenommen. Daher erfolgt hier ebenfalls keine separierte Betrachtung von Lerneffekten oder Erfahrungskurveneffekten sowie Komplexitäts-Effekten, sondern die Annahme einer zusammengefassten und integrierten Betrachtung über die erhobenen Stückzahlen.

5.3.3 Zusammenfassung genereller Einschränkungen und Restriktionen

Bevor im nächsten Abschnitt die Ergebnisse der Datenaufnahme zum Personalbedarf dargestellt werden, soll an dieser Stelle nochmals erwähnt sein, dass alle ermittelten Ergebnisse Annahmen unterliegen, welche im Rahmen des Forschungsprojektes getroffen wurden. Die Kenntnis dieser ist zur Interpretation der Auswertung der Ergebnisse zum Personalbedarf essentiell notwendig und nachfolgend aufgelistet:

Einschränkung Forschungsfokus von ELAB

- ELAB fokussiert auf die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Berücksichtigt werden hierbei die Komponenten „Verbrennungsmotor“ und „Getriebe“ des konventionellen Antriebsstrangs sowie die Komponenten des elektrischen Antriebs „Batteriesystem“, „Elektromotor“, „Leistungselektronik“, „Brennstoffzellensystem“
- ELAB fokussiert auf die eigene Produktion definierter Komponenten (sowohl konventionell als auch neu). Es erfolgt keine Analyse von zugekauften Komponenten im Projekt, weder mengenmäßig noch in Bezug auf Wirkungen im Personalbedarf. Die Definition der berücksichtigten Komponenten erfolgt im Kapitel Bauteilanalyse
- ELAB fokussiert auf eine idealtypische Produktion: Daher wird stets von einem Standort der Produktion ausgegangen. Effekte der Verlagerung und Verteilung der Wertschöpfung auf verschiedene Standorte werden nicht untersucht
- ELAB fokussiert auf eine idealtypische Aggregateproduktion: Daher steht eine Produktion im Vordergrund. Volkswirtschaftliche Aussagen oder Aussagen über Effekte in der Zulieferstruktur werden dabei nicht erarbeitet

Einschränkung Ermittlung Personalbedarf

- Die Ermittlung des Personalbedarfs erfolgte insbesondere durch Interviews oder die Auswertung von Sekundärdaten
- Die Ermittlung des Personalbedarfs wurde zu zwei komponentenspezifisch definierten Produktionszahlen durchgeführt. Der Personalbedarf zu weiteren Produktionszahlen wird durch Interpolation und Extrapolation gewonnen
- Die Ermittlung des Personalbedarfs fokussiert auf den Bereich der Produktion. Eine Differenzierung erfolgt hierbei nach direkten, indirekten produktionsnahen, sowie indirekten Mitarbeitern. Personalbedarfsänderungen in Forschung und Entwicklung oder sonstigen wie Verwaltung wurde nicht aufgenommen oder analysiert
- Die veröffentlichten Daten des Personalbedarfs beziehen sich nicht auf die Aussagen einzelner Firmen, sondern sind als zusammenfassende Abschätzung der Forschungseinrichtungen zu interpretieren. Daher sind Abweichungen zu den Datensätzen produzierender Unternehmen unausweichlich
- Die veröffentlichten Daten des Personalbedarfs müssen als idealtypisch unter den gesamten Annahmen und Restriktionen des Forschungsprojektes gesehen werden
- Die Interviews erfolgten mit ausgesuchten Experten in einem geschlossenen Kreis in zahlreichen Unternehmen durch gezielte Ansprache

Technologische Einschränkung und Entwicklungen

- Zukünftige Entwicklungen in Bezug auf Möglichkeit zur Produktion von Komponenten in automobilrelevanter Stückzahl und Qualitätsanspruch wurden durch die geführten Interviews integriert und soweit wie notwendig und möglich berücksichtigt
- Die Interviews zur Ermittlung des Personalbedarfs und Definition der Prozessschritte erfolgten im Jahr 2011/12 und spiegeln den damaligen Stand der Forschung und Stand der Technik wider
- Zukünftige Entwicklungen sowohl am Produkt als auch an der Produktionstechnologie/-prozess, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung nicht bekannt oder relevant waren, können hingegen nicht berücksichtigt werden
- Lerneffekte sowie Komplexitäts-Effekte werden nicht explizit berücksichtigt. Es erfolgt eine zusammengefasste Betrachtung und Annahme der gegenseitigen Aufhebung, beziehungsweise die Annahme einer vorliegenden Integration in den erhobenen Daten

Annahmen zu Eigen- und Fremdfertigung

- Make-or-Buy Entscheidungen erfahren keine Berücksichtigung im Rahmen des ELAB Projektes, weder für Komponenten, noch für deren Bestandteile. Ebenfalls werden keine Analysen oder Empfehlungen zu Make-or-Buy Entscheidungen durchgeführt
- Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil ist als betriebswirtschaftliche Größe definiert. Er ist bezogen auf Kosten und nicht auf Zeiten, oder Prozessschritte. Daher besitzt er keine direkte Korrelation zur Größe „Personalbedarf“
- Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil wird definiert auf Basis der definierten eigenerstellten und fremdbezogenen Komponenten. Eine Validierung erfolgte durch die geführten Interviews und durch Experten-Workshops. Die getroffene Festlegung wird als idealtypisch angenommen
- Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil erlaubt keine Rückrechnung auf quantitative personelle Effekte bei Zulieferern. Dies ist durch den Ansatz der bisherigen Erhebung zum wertmäßigen Eigenfertigungsanteil und die hinterlegten Datenmaterialien nicht möglich
- Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil stellt keine Empfehlung für die Gestaltung zukünftiger Produktionen dar, sondern ist lediglich eine im Rahmen des Projektes festgelegte Annahme einer möglichen Ausprägung und dient ausschließlich dem Vergleich unterschiedlicher Komponenten

- In der bei ELAB betrachteten idealtypischen Antriebsstrangproduktion gilt die Annahme eines pro Komponente definierten und über die Zeit gleichbleibenden wertmäßigen Eigenfertigungsanteils für Komponenten der konventionellen sowie alternativen Antriebsstänge

5.4 Zusammenfassung Personalbedarf

Für die Bestimmung des Arbeitsaufwandes wird der Personalbedarf einer jeweiligen Basiskomponente bezogen auf einen bestimmten Leistungskennwert ermittelt. Die Erhebung der Daten erfolgte jeweils für zwei unterschiedliche Produktionszahlen. Die hierfür erhobenen Werte stammen aus Expertengesprächen bei Unternehmen, welche in der Herstellung der betrachteten Komponenten tätig sind. Die Interviewergebnisse wurden, wie oben beschrieben, zusammengeführt mit Werten aus einer Sekundärdaten-Recherche korreliert und validiert.

5.4.1 Personalbedarf der Einzelkomponenten

Die Darstellung des Personalbedarfs der Einzelkomponenten erfolgt gemäß den zusammengeführten und validierten Daten der Primär- und Sekundärdaten Recherche. Hierbei werden für die einzelnen Komponenten Informationen zu nachfolgenden Punkten aufgezeigt:

- Bezeichnung der Basiskomponenten (nach ELAB-Festlegung)
- Angabe der Leistungskennwerte der jeweiligen Komponente (nach ELAB-Festlegung)
- Angabe des angenommenen wertmäßigen Eigenfertigungsanteils (idealtypisch)
- Auflistung des Personalbedarfs nach definierter Mitarbeiter Beschreibungssprache in direkte, produktionsnahe indirekte sowie indirekte Mitarbeiter
- Darstellung des erhobenen Personalbedarfs unter Berücksichtigung differenzierter Produktionszahlen
- Zusammenfassung des Gesamt-Personalbedarfs
- Angaben zum Personalbedarf erfolgen als Netto-Werte im 3-Schicht-Betrieb

Die Komponenten und Leistungskennwerte basieren auf den vorangegangenen Beschreibungen der Fahrzeugkonzepte und Komponentendefinition des Projektes. Der wertmäßige Eigenfertigungsanteil wurde auf Basis der in der Bauteilanalyse angenommenen Aufteilung der Komponenten in Eigenerstellung und Fremdbezug definiert. Unterschiede in den Produktionsvolumen ergeben sich aus den geführten Interviews sowie erhobenen Datenmaterialien, hierbei wurde die jeweils geringstmögliche Abstraktion von den vorhandenen Daten angestrebt.

Verbrennungskraftmaschine 100kW				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (hohe Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
20%	250.000		1.000.000	
Direkte MA	303	69%	1.212	77%
Prod.-nahe indirekte MA	105	24%	287	18%
Indirekte MA	30	7%	78	5%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	438		1.577	

Automatikgetriebe 8-Gang				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (hohe Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
45%	250.000		1.000.000	
Direkte MA	471	66%	1.884	74%
Prod.-nahe indirekte MA	193	27%	528	21%
Indirekte MA	50	7%	129	5%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	714		2.541	

Hybridgetriebe 8-Gang (ohne Fertigung E-Maschine)				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (hohe Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
40%	250.000		1.000.000	
Direkte MA	448	66%	1.792	74%
Prod.-nahe indirekte MA	183	27%	500	21%
Indirekte MA	48	7%	124	5%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	679		2.416	

Elektrische Maschine (verteilte Wicklung) 100kW				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
50%	100.000		500.000	
Direkte MA	84	76%	260	79%
Prod.-nahe indirekte MA	20	18%	52	16%
Indirekte MA	6	5%	16	5%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	110		328	

Elektrische Maschine (Zahnwicklungen) 30kW				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
45%	100.000		500.000	
Direkte MA	45	71%	95	66%
Prod.-nahe indirekte MA	13	21%	35	24%
Indirekte MA	5	8%	14	10%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	63		144	

Leistungselektronik (Inverter, Konverter) 100kW				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
55%	35.000		500.000	
Direkte MA	30	71%	147	68%
Prod.-nahe indirekte MA	8	19%	50	23%
Indirekte MA	4	10%	19	9%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	42		216	

Hochleistungs-Batteriesystem (Rundzelle, ohne Zellfertigung) 5kWh				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
30%	30.000		100.000	
Direkte MA	22	63%	51	67%
Prod.-nahe indirekte MA	9	26%	17	22%
Indirekte MA	4	11%	8	11%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	35		76	

Hochenergie-Batteriesystem (Pouch-Zelle, ohne Zellfertigung) 20kWh				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
25%	30.000		100.000	
Direkte MA	24	65%	55	65%
Prod.-nahe indirekte MA	9	24%	21	25%
Indirekte MA	4	11%	8	10%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	37		84	

Brennstoffzellen-System (PEM) 100kW				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
50%	15.000		100.000	
Direkte MA	38	67%	158	71%
Prod.-nahe indirekte MA	14	25%	49	22%
Indirekte MA	5	9%	17	8%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	57		224	

Wasserstoff-Drucktank 2kg				
Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen (niedrige Automat.)		Produktionsvolumen (hohe Automat.)	
60%	15.000		100.000	
Direkte MA	24	73%	55	70%
Prod.-nahe indirekte MA	6	18%	16	20%
Indirekte MA	3	9%	8	10%
Personal-Gesamtbedarf (netto)	33		79	

Abbildung 66: Einzelüberblick Personalbedarf der analysierten Komponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)

5.4.2 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Wie beschrieben müssen die dargestellten Daten zum Personalbedarf gemäß den Anforderungen des Forschungsprojektes im weiteren Verlauf angepasst werden. Dies bezieht sich sowohl auf eine Anpassung des Produktionsvolumens, als auch die Umstellung von Netto- auf Brutto-Werten. Darüber hinaus hat eine Anpassung der Basiskomponenten an die im Rahmen der Szenarien definierten Komponenten zu erfolgen. Basierend auf den ermittelten stückzahlabhängigen Zahlen werden im Weiteren Personalbedarfe einer idealtypischen Produktion für die in ELAB definierten Szenarien ermittelt. Für die Ermöglichung der Interpolation und Extrapolation zwischen den stückzahlabhängigen Werten des Personalbedarfs sind klare Regeln und Annahmen zu treffen. Diese werden im nächsten Hauptkapitel aufgestellt und ausgeführt. Ebenfalls wird dort die Umrechnung der Netto-Werte auf Brutto-Werte vorgenommen.

Einige der oben dargestellten Einzelwerte des Personalbedarfs wurden gemäß den angesprochenen Regeln der Extrapolation und Interpolation aufbereitet. Zur besseren Übersicht findet sich eine zusammengefasste Darstellung der aggregierten Werte des Personalbedarfs aller Komponenten in nachfolgender Abbildung.

Personal-Gesamtbefarf (netto)	Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil	Produktionsvolumen				
		30.000	100.000	250.000	500.000	1.000.000
Verbrennungskraftmaschine 100kW	20%			438		1.577
Automatikgetriebe 8-Gang	45%			714		2.541
Hybridgetriebe 8-Gang (ohne Fertigung E-Maschine)	40%			679		2.416
Elektrische Maschine (verteilte Wicklung) 100kW	50%		110		328	
Elektrische Maschine Hybridgetriebe (Zahnwicklung) 30kW	45%		63		144	
Leistungselektronik (Inverter, Konverter) 100kW	55%		117		216	
Hochleistungs-Batteriesystem (Rundzelle) 5kWh	30%	35	76			
Hochenergie-Batteriesystem (Pouch-Zelle) 20kWh	25%	37	84			
Brennstoffzellen-System (PEM) 100kW	50%	109	224			
Wasserstoff-Drucktank 2kg	60%	64	79			

Abbildung 67: Überblick Personalbedarf für die analysierten Komponenten (angepasst) (Grafik: Fraunhofer IAO)

6 Ermittlung des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion

Autoren: Prof. Dr. Wilhelm Bauer (Fraunhofer IAO), Marius Brand (Fraunhofer IAO), Daniel Borrmann (Fraunhofer IAO), Florian Herrmann (Fraunhofer IAO), Simon Voigt (Fraunhofer IAO), Florian Rothfuss (Fraunhofer IAO)

6.1 Einführung

Im Rahmen des ELAB-Projekts wurde vom Fraunhofer IAO ein Tool zur quantitativen Analyse des Mitarbeiterbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion erstellt. Hiermit wird einer weiteren Forschungsfrage des Projektes nachgegangen: Wie stark ist der Einfluss der Elektrifizierung auf den Gesamt-Personalbedarf in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion? Unter Berücksichtigung der zuvor erarbeiteten Szenarios und Antriebsstrangkonzeppte sowie den ermittelten stückzahlabhängigen Personalbedarfen auf Komponentenebene, sollen nun mögliche Veränderungen des Personalbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion aufgezeigt werden. Hierzu wurde ein Excel-Tool programmiert, um die vielfältigen Abhängigkeiten und hinterlegten Datensätze zusammen zu bringen. Dieses soll im Folgenden beschrieben werden. Die Unterkapitel sind nach dem Datenfluss im Tool gegliedert.

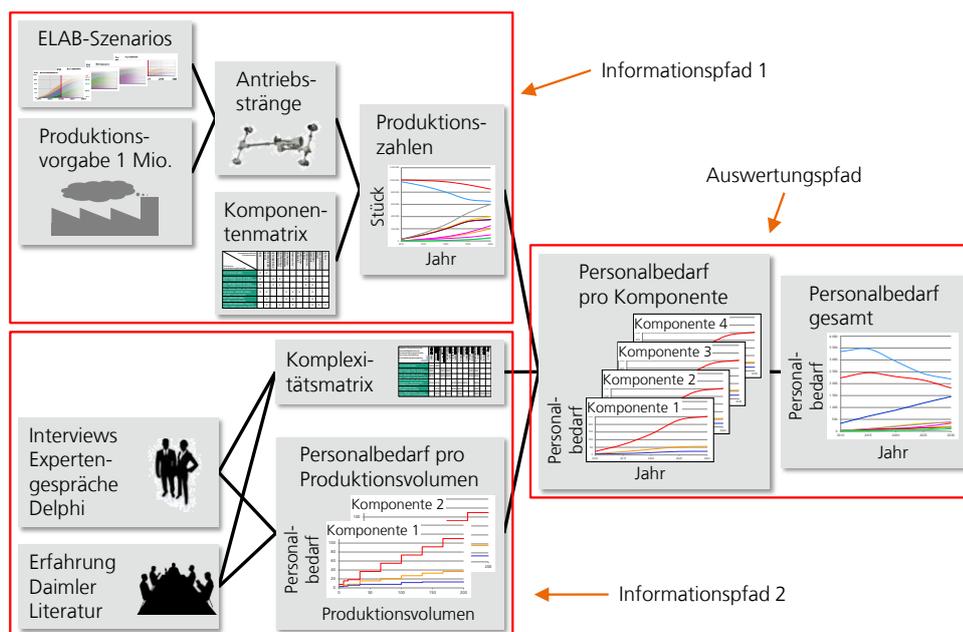


Abbildung 68: Informationsfluss des Excel-Tools (Grafik: Fraunhofer IAO)

Der erste Informationspfad nutzt die Ergebnisse der ELAB-Szenarios. Es wird eine jährliche Produktion von 1 Million Antriebssträngen angenommen. Es ergeben sich antriebsstrangspezifische Produktionszahlen, da unterschiedliche Antriebsstrangkonzeppte andere Komponenten benötigen. Diese Zusammenhänge integriert die Komponentenmatrix.

In den ELAB-Szenarios wurden Produktionszahlen für 6 Antriebsstrangkonzeppte prognostiziert:

- Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICE)
- Mild-Hybrid (Mild)

- Full-/Plug-In-Hybrid (HEV)
- Range Extender (REX)
- Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)
- Brennstoffzellenfahrzeug (FCV)

Der zweite Informationspfad speist sich aus Interviews, Expertengesprächen, einer Delphi-Analyse sowie Erfahrungen der Projektpartner und Sekundärliteratur. Durch die Komplexitätsmatrix, deren Beschreibung in Kapitel 6.3 zu finden ist, werden Komponenten antriebsstrangabhängig gewichtet. Außerdem wird der Personalbedarf der Komponentenproduktion volumenabhängig aufgezeigt.

Im Auswertungspfad kommen die Ergebnisse der Informationspfade 1 und 2 zusammen und werden in den gewichteten Personalbedarf pro Komponente umgerechnet. Es ergibt sich als Endergebnis des Tools der Gesamtbedarf an Personal in allen betrachteten Jahren. Der Berechnungsweg unterscheidet sich aufgrund von Software-spezifischen Vorgaben vom Informationsfluss.

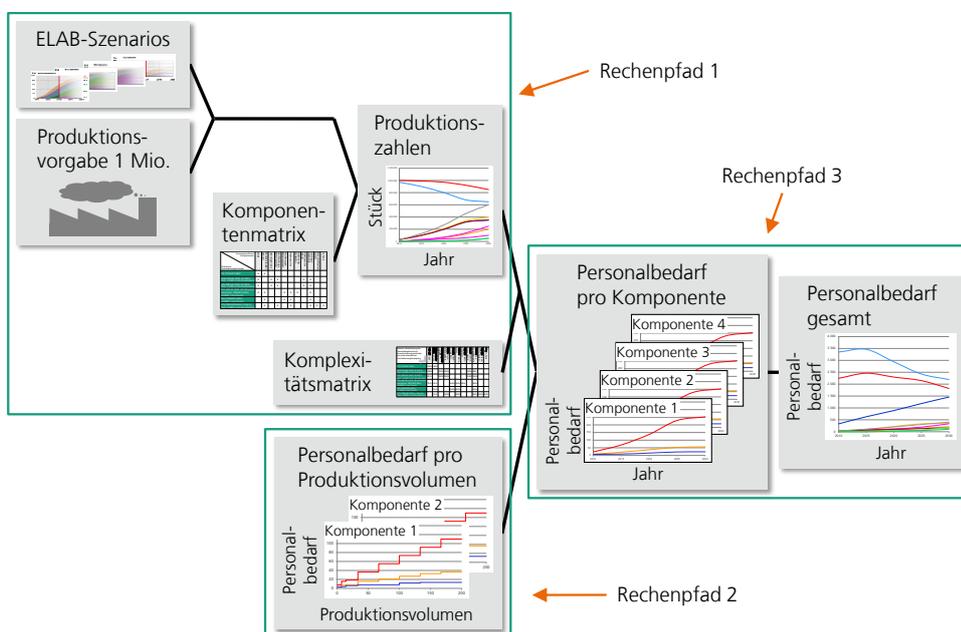


Abbildung 69: Rechenweg des Excel-Tools (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die Komplexitätsmatrix wird im Tool direkt mit den Produktionszahlen verrechnet und nicht mit dem Personalbedarf pro Produktionsvolumen, da die Komplexität eine Komponentengewichtung darstellt. Daher ist sie im ersten Rechenpfad integriert. Der zweite Rechenpfad ist modellbezogen wesentlich aufwändiger als Rechenpfad 1, da dort mehrere Entscheidungshebel greifen. Rechenpfad 3 entspricht inhaltlich dem Auswertungspfad. Die Entscheidungsvariable der Zielfunktion des Modells ist der Personalbedarf. Alle Kalkulationen berücksichtigen das Vorsichtsprinzip aus Personalbedarfssicht und geben die Mindestzahl an benötigten Mitarbeitern aus, sofern mehrere Ergebnisse möglich sind.

6.2 Vorgehen

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben detailliert, welche Größen in die Informationspfade 1 und 2 eingehen und wie ihre Verarbeitung erfolgt. Dabei werden als Zwischenergebnisse etwa Komponentenproduktionszahlen oder die Entwicklung

von Personalbedarfen bei höheren Produktionsvolumen ermittelt, die anschließend in den im Kapitel 6.4 beschriebenen Auswertungspfad eingehen.

6.2.1 Informationspfad 1: Produktionszahlen

Wie zuvor beschrieben wurden ELAB-Szenarios erstellt, die die zukünftigen Produktionsanteile von Fahrzeugen alternativer Antriebsstränge prognostizieren. Das Ergebnis dieser Szenarios besteht aus relativen Zahlen (Prozentangaben). Tabelle 8 zeigt ein Beispiel.

Referenz-Szenario

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
ICE	97%	87%	73%	54%	40%
Mild	3%	5%	9%	12%	15%
HEV	0%	5%	11%	20%	20%
REX	0%	2%	4%	6%	10%
BEV	0%	1%	2%	6%	10%
FCV	0%	0%	1%	2%	5%
	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle 8: Referenzszenario

Im Referenzszenario werden also im Jahr 2030 40% Verbrenner, 15% Mildhybride, 20% Vollhybride, 10% Range-Extender, 10% Batterieelektrische Fahrzeuge und 5% Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb hergestellt. Diese relativen Anteile werden in einem ersten Schritt zu absoluten Zahlen umgerechnet, wobei 100% der festgelegten Größe von 1 Million Antriebssträngen entsprechen. Diese Absolutzahlen stellen die Produktions- und Absatzmenge einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion in den definierten ELAB-Szenarios dar. In einer späteren Analyse werden unter dem Begriff „Annahmekomplexe“ verschiedene strategische Überlegungen analysiert. Diese schließen beispielsweise die Produktion neuer Komponenten aus. Eine derartige Annahme kann dazu führen, dass die Menge der tatsächlich produzierten und abgesetzten Antriebsstränge (beziehungsweise der dafür produzierten Komponenten) nach unten von der definierten Größe von 1 Million abweicht.

Referenz-Szenario

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
ICE	970.000	870.000	730.000	540.000	400.000
Mild	30.000	50.000	90.000	120.000	150.000
HEV	0	50.000	110.000	200.000	200.000
REX	0	20.000	40.000	60.000	100.000
BEV	0	10.000	20.000	60.000	100.000
FCV	0	0	10.000	20.000	50.000
	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000

Tabelle 9: Referenzszenario (absolut)

Damit sind die Zahlen der jährlich zu produzierenden Antriebsstränge bekannt. Diese Zahlen liegen jedoch in einer zu hohen Aggregationsstufe vor: zur Berechnung von Mitarbeiterzahlen werden die Produktionszahlen auf Komponentenebene benötigt.

Die benötigten Komponenten pro Antriebsstrang werden in der Komponentenmatrix beschrieben. Diese zeigt auf, welches Antriebsstrangkonzzept welche Komponenten bzw. Komponentenausführungen (z.B. konventionelles Getriebe vs. Hybrid-Getriebe, Batteriesystem erforderlich?) benötigt, und ist in Tabelle 10 dargestellt.

	VKM	Getriebe (außer Hybrid)	Hybridgetriebe	Hochleistungs-Batteriesystem	Hochenergie-Batteriesystem	Elektromotor	Elektrischer Generator	Elektromotor Hybrid	Leistungselektronik	Brennstoffzellen-System	H ₂ -Tank
ICE	X	X									
Mild	X		X	X				X	X		
HEV	X		X	X				X	X		
REX	X	X			X	X	X		X		
BEV		X			X	X			X		
FCV		X		X		X			X	X	X

Tabelle 10: Komponentenmatrix

Die Komponentenmatrix betrachtet die Komponenten:

- Verbrennungskraftmaschine (VKM)
- Getriebe (außer Hybrid)
- Hybridgetriebe
- Hochleistungs-Batteriesystem
- Hochenergie-Batteriesystem
- Elektromotor
- Elektrischer Generator
- Elektromotor Hybrid
- Leistungselektronik
- Brennstoffzellen-System
- Wasserstofftank

Es zeigt sich, dass die Komplexität der Antriebsstränge mit Hybridfähigkeit im Vergleich zum Verbrenner und zu batterieelektrischen Fahrzeugen höher ist, da neben elektrischen Komponenten auch noch eine VKM benötigt wird.

Mit der Kenntnis des Komponentenbedarfs je Antriebsstrang kann die benötigte Produktionszahl aller Komponenten pro Jahr (für alle ELAB-Szenarios) berechnet werden. Hierfür werden die Informationen der Komponentenmatrix mit den Zahlen

aus den Szenarios gekoppelt. Es ergeben sich Szenario-spezifische Übersichten der Komponentenproduktionszahlen bis 2030.

Nachfolgend zeigen Abbildung 70 bis Abbildung 73 die absoluten Zahlen der benötigten Komponenten pro Jahr für die vier ELAB-Szenarios. Dabei folgen die Stückzahlen der am Anfang dieses Kapitels beschriebenen, durch die ELAB-Szenarios definierten prozentualen Aufteilung der Produktionsvorgabe von 1 Million Antriebssträngen in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion.

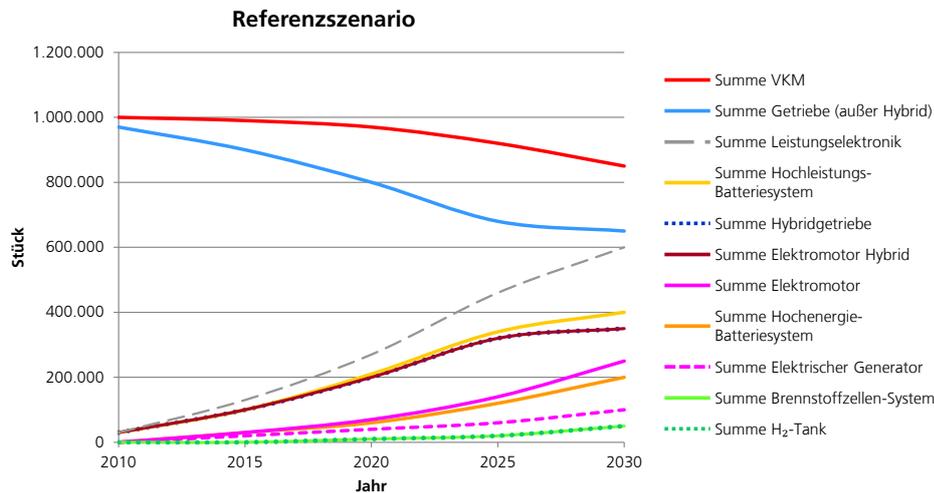


Abbildung 70: Komponentenproduktionszahlen im Referenzszenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

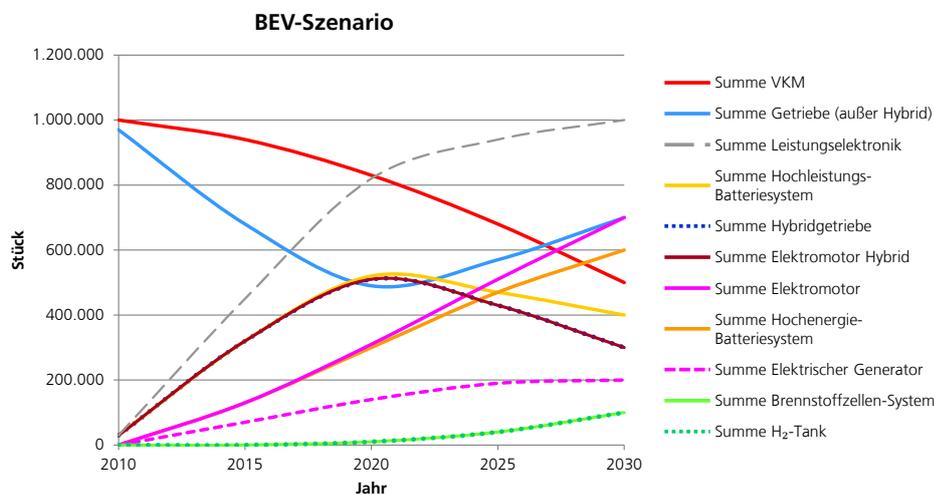


Abbildung 71: Komponentenproduktionszahlen im BEV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

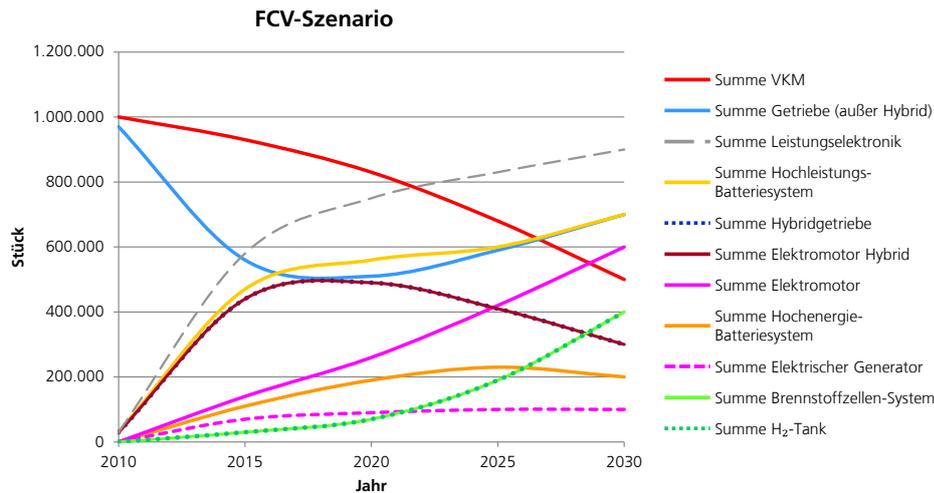


Abbildung 72: Komponentenproduktionszahlen im FCV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

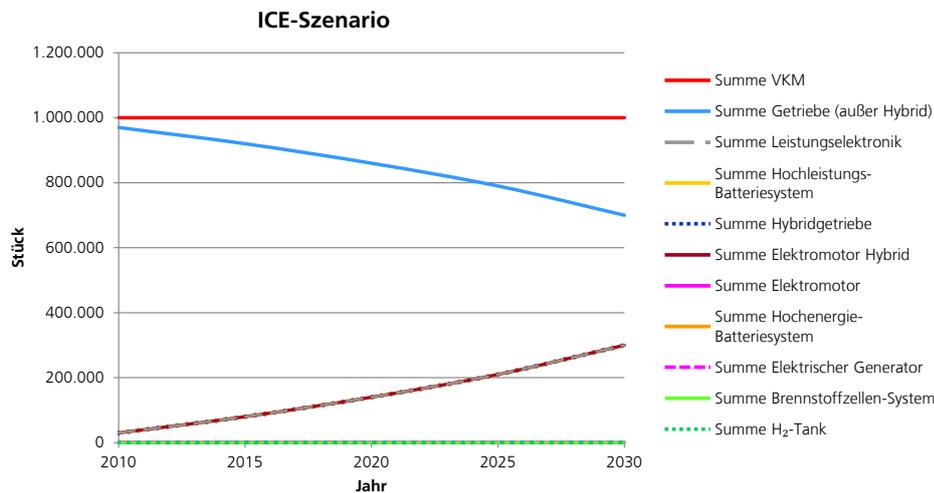


Abbildung 73: Komponentenproduktionszahlen im ICE-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

Damit ist der Informationspfad 1 abgeschlossen. Es liegen die Produktionszahlen für jede Komponente Szenario-spezifisch vor.

6.2.2 Informationspfad 2: Empirische Daten

Durch den Informationspfad 2 werden die empirisch erhobenen und recherchierten Daten ins Modell integriert. Diese wurden durch Experteninterviews, Literaturrecherche, Erfahrungen der Projektpartner und die Delphi-Methode erarbeitet.

Abgefragt wurde der benötigte Personalbedarf für alle betrachteten Komponenten in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge, Linienanzahl, Schichtenanzahl und des Automatisierungsgrads der Antriebsstrangproduktion. Außerdem wurden Einschätzungen zu den Produktionsvolumen der Komponenten eingeholt.

Eine Linie besteht aus bis zu drei Schichten. Daten wurden für zwei unterschiedliche Automatisierungsgrade („niedrig“, „hoch“) erhoben. Die Mitarbeiter sind dabei in direkte Mitarbeiter, produktionsnahe indirekte Mitarbeiter und indirekte Mitarbeiter unterteilt. Der Personalbedarf verändert sich sprunghaft mit den Linien und Schichten (Prämisse: gleicher Standort).

Direkte Mitarbeiter: Lohnarbeiter, die direkt an der Produktion beteiligt sind
 Annahme: Lineare Steigung des Mitarbeiterbedarfs über mehrere Linien und Schichten (Prämisse: gleicher Standort).

Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter: Mitarbeiter, die zwar an der Produktion beteiligt sind, jedoch nicht direkt bspw. mit Montagetätigkeiten beschäftigt sind (70% Logistiker, 20% Instandhalter, 10% Qualitätssicherer)

Annahme: Steigung des Personalbedarfs ist über mehrere Linien insgesamt degressiv, da mit wachsender Anzahl der Linien Degressionseffekte auftreten (Prämisse: gleicher Standort). Für jede weitere Linie werden nur noch 50% der zuvor zusätzlich notwendigen Instandhalter und Qualitätssicherer benötigt. Der Zuwachs an Logistikern ist linear ausgeprägt. Der Personalbedarf der produktionsnahen indirekten Mitarbeiter ist also bei jeder neuen Linie 25% geringer.

Indirekte Mitarbeiter: Mitarbeiter, die die Produktion planen, jedoch nicht direkt an ihr beteiligt sind (Meister und Planer).

Annahme: Steigung des Personalbedarfs ist über mehrere Linien degressiv, da mit steigender Anzahl der Linien Degressionseffekte auftreten (Prämisse: gleicher Standort). Bei der ersten Linie beträgt das Verhältnis von Meistern und Planern 1:2. Für die zweite Linie müssen genauso viele Meister, aber nur halb so viele Planer zusätzlich eingestellt werden wie für die erste Linie. Für jede weitere Linie müssen genauso viele Meister, aber nur halb so viele Planer zusätzlich eingestellt werden wie für die vorherige Linie. Tabelle 11 zeigt dies anschaulich.

	MA-Verhältnis nur bei 1. Linie	MA-Verhältnis nur bei 2. Linie	MA-Verhältnis nur bei 3. Linie	...
Meister	1	$\frac{1}{1}$ (-1/3 gegenüber MA bei 1. Linie)	$\frac{1}{1/2}$ (-1/4 gegenüber MA bei 2. Linie)	...
Planer	2			...

Tabelle 11: Annahmen indirekte Mitarbeiter

Das Produktionsvolumen ergibt sich in linearer Abhängigkeit der Linienanzahl (Prämisse: gleicher Standort). Wurden für eine Komponente keine Daten für die erste Linie erhoben, berechnet sich das Produktionsvolumen der ersten Linie aus dem erhobenen Produktionswert geteilt durch die erhobene Linienanzahl. Der zugehörige Personalbedarf wurde modellkonform (unter Berücksichtigung der Entwicklung der Zahlen für direkte, produktionsnahe indirekte und indirekte Mitarbeiter) integriert.

Des Weiteren wurden die oben beschriebenen Arten, auf die sich Personalbedarfe bei mehreren Linien verändern, zur Inter- und Extrapolation angewendet. So war die Ermittlung von solchen Werten möglich, die zwischen den empirisch erhobenen und recherchierten Daten liegen oder darüber hinausgehen.

In Abbildung 74 ist die im Rahmen des ELAB-Projekts angenommene Entwicklung des Personalbedarfs über mehrere Linien beispielhaft schematisch dargestellt.

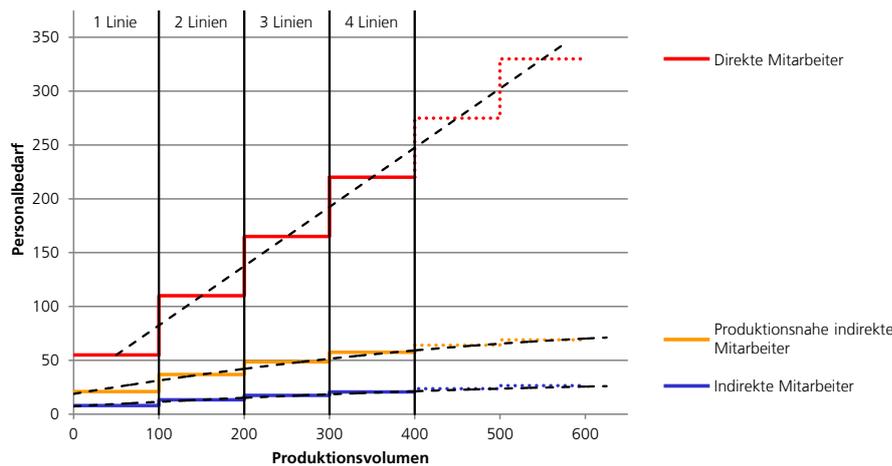


Abbildung 74: Annahmen Mitarbeiterbedarf (Grafik: Fraunhofer IAO)

Innerhalb einer Linie¹ wurden schichtabhängig weitere Verfeinerungen ins Modell eingearbeitet. Diese berücksichtigen, dass Personalbedarfsveränderungen zwischen Linien nicht auf die Veränderungen zwischen Schichten übertragbar sind. Die Werte für eine Linie beziehen sich auf einen Betrieb in drei Schichten während einer Fünftageweche. Werden weniger als drei Schichten gefahren, fällt der Personalbedarf der direkten Mitarbeiter linear. Bei den produktionsnahen indirekten und indirekten Mitarbeitern muss auf die Unterscheidung der Tätigkeitsfelder geachtet werden. Tabelle 12 zeigt die erforderliche Anwesenheit der Mitarbeiter in Abhängigkeit der Schichten. „X“ bedeutet hierbei erforderliche Anwesenheit. Bei den schichtabhängigen Produktionsvolumen geht das Modell von Linearität aus.

Anwesenheit in Schicht	Direkte MA	Produktionsnahe indirekte MA			Indirekte MA	
		Logistiker	Instandhalter	Qualitätssicherung	Planer	Meister
1	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X			X
3	X	X				

Tabelle 12: Erforderliche Anwesenheit in Schichten

Bei den produktionsnahen indirekten und indirekten Mitarbeitern ist die Aufteilung in Tätigkeitsfelder nicht gleich verteilt (70% Logistiker, 20% Instandhalter, 10% Qualitätssicherer bei den produktionsnahen indirekten Mitarbeitern, siehe Tabelle 11 für indirekte Mitarbeiter). Wird dies berücksichtigt, ergeben sich folgende Ergebnisse für die Anteile der benötigten Mitarbeiter beim Fahren von einer und zwei Schichten (jeweils im Vergleich zur 100%-Auslastung der drei Schichten).

¹ Sofern mehrere Antriebsstrangkonzepete gleiche oder ähnliche Komponenten benötigen, besteht in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion die Möglichkeit, diese auf den gleichen Linien zu fertigen, um die Produktion effizienter zu gestalten. Das Excel-Werkzeug berücksichtigt diese Möglichkeit zur Effizienzsteigerung automatisch.

betriebene Schichten	erreichbares Produktionsvolumen einer Linie	Personalbedarf für eine Linie		
		Direkte MA	Prod.-nahe indirekte MA	Indirekte MA
1	33%	33%	38%	75%
2	67%	67%	73%	100%
3	100%	100%	100%	100%

Tabelle 13: Erforderliche Anwesenheit in Schichten II

Das Modell erlaubt die Unterteilung der Linien in Schichten bei der jeweils „letzten“ Linie. Wird beispielsweise in drei Linien produziert, sind die ersten zwei Linien voll mit drei Schichten ausgelastet. Der Grund ist, dass eine geringe Auslastung mehrerer Linien ökonomisch ineffizient und daher nicht realistisch ist. Zur Veranschaulichung erfolgt ein Zahlenbeispiel, bei dem zur Vereinfachung nur direkte Mitarbeiter betrachtet werden:

- Das erreichbare Produktionsvolumen einer Linie im Dreischichtbetrieb betrage **100** Einheiten; der Personalbedarf betrage **54**
- Das erreichbare Produktionsvolumen einer Linie im Zweischichtbetrieb betrage **66,7** Einheiten; der Personalbedarf betrage **36**
- Das erreichbare Produktionsvolumen einer Linie im Einschichtbetrieb betrage **33,3** Einheiten; der Personalbedarf betrage **18**

Das erreichbare Produktionsvolumen von zwei Linien im Einschichtbetrieb beträgt 133,3 Einheiten (**100 + 33,3**); der Personalbedarf beträgt 72 (**54 + 18**)

Das erreichbare Produktionsvolumen von zwei Linien im Zweischichtbetrieb beträgt 166,7 Einheiten (**100 + 66,7**); der Personalbedarf beträgt 90 (**54 + 36**)

Das erreichbare Produktionsvolumen von zwei Linien im Dreischichtbetrieb beträgt 200 Einheiten (**100 + 100**); der Personalbedarf beträgt 108 (**54 + 54**)

Abbildung 75 visualisiert dieses Beispiel.

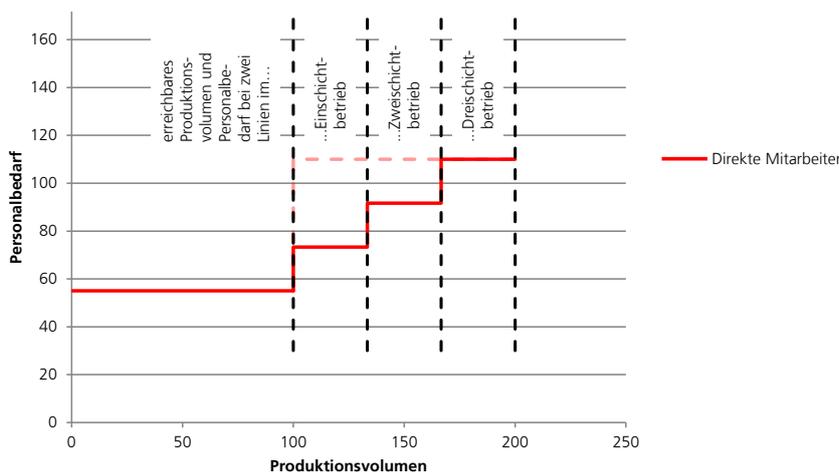


Abbildung 75: Beispiel Schichtbetrieb (Grafik: Fraunhofer IAO)

Durch Anwendung des beschriebenen Vorgehens hinsichtlich des Schichtbetriebs arbeitet die „letzte“ Linie je Komponenten in der hier betrachteten idealtypischen

Antriebsstrangproduktion teilweise im 2- oder 1-Schichtbetrieb, um dadurch einen geringeren Personalbedarf zu verursachen.

Wie oben erwähnt, wurden die Produktionszahlen und der Personalbedarf für unterschiedliche Automatisierungsgrade abgefragt. Dies berücksichtigt, dass geringe Produktionsmengen in einer Anlage mit hohem Automatisierungsgrad nicht ökonomisch effizient erstellt werden können. Das im Rahmen des ELAB-Projekts angewendete Modell betrachtet unter der Prämisse des gleichen Standorts für jede Produktionshöhe die abgefragten Personalbedarfe für niedrigen und hohen Automatisierungsgrad. Unabhängig von möglichen Fixkostendifferenzen (durch Kapitalkosten der Investitionen) wird der Automatisierungsgrad gewählt, der zum geringeren Personalbedarf führt. Dies folgt dem Vorsichtsprinzip: Kalkuliert wird mit dem Personalbedarf, der nicht zu mehr Arbeitsplatzverlusten führen kann.

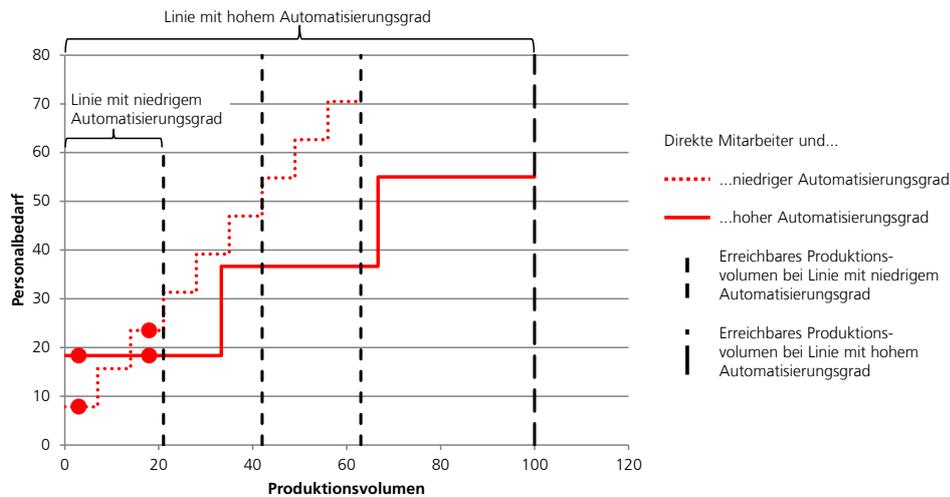


Abbildung 76: Wahl des Automatisierungsgrads (Grafik: Fraunhofer IAO)

In Abbildung 76 erreicht der Personalbedarf des niedrigen Automatisierungsgrads einen höheren Wert als der des hohen Automatisierungsgrads in der dritten Schicht der ersten Linie, während er z.B. noch in der ersten Schicht darunter lag (siehe rote Vergleichspunkte). Würde das zu produzierende Volumen also eine dritte Schicht im niedrigen Automatisierungsgrad nötig machen, springt das Modell auf den hohen Automatisierungsgrad. Komponentenspezifisch kann der niedrige Automatisierungsgrad irrelevant sein, wenn der Personalbedarf im hohen Automatisierungsgrad diesen schon bei geringen Produktionsmengen unterschreitet.

In Sonderfällen kann sich das Produktionsvolumen, bei dem von niedrigem zu hohem Automatisierungsgrad gewechselt wird, bezüglich der Mitarbeiterarten (direkt, produktionsnah indirekt, indirekt) unterscheiden. Dies veranschaulicht Abbildung 77. Da die Entscheidungsvariable im Rahmen der angestellten Berechnungen der Personalbedarf und nicht die Personalkosten sind, wird der gesamte Personalbedarf (alle Mitarbeiterarten kumuliert) als Kriterium für den Automatisierungswechsel genutzt.

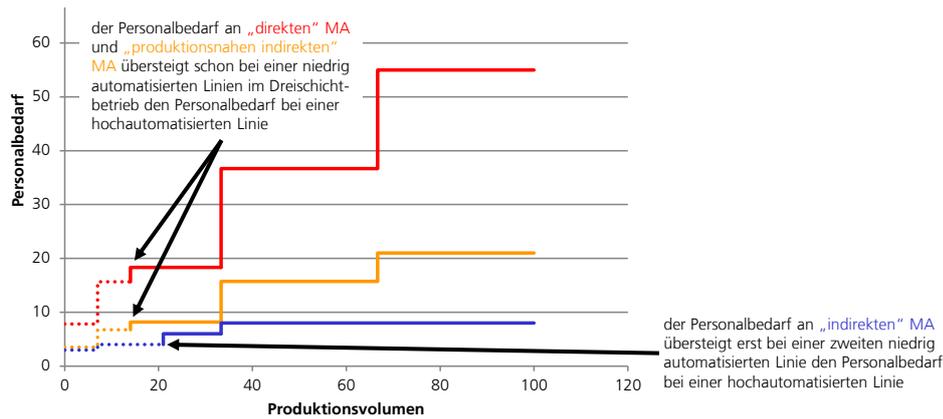


Abbildung 77: Wahl des Automatisierungsgrads II (Grafik: Fraunhofer IAO)

Bisher verlief die Kalkulation der Personalbedarfe rein komponentenbasiert. Im ELAB-Projekt werden außerdem beispielhafte Antriebsstrangkonzeppte betrachtet (siehe Kapitel 6.1). Die Komponentenproduktion kann je nach Antriebsstrangkonzeppt eine unterschiedlich hohe Komplexität aufweisen. Daher wurde eine Komplexitätsmatrix konzipiert, die diesen Unterschieden Rechnung trägt (siehe Kapitel 6.3). Die Annahmen dieser Matrix gehen in einem Modell-internen Schritt in die Berechnung mit ein.

Nachdem der Personalbedarf in Abhängigkeit von Produktionsvolumen, Automatisierungsgrad, Mitarbeiterart sowie Linien- und Schichtanzahl errechnet wurde, können im Modell mehrere Hebel gesetzt werden.

- a) Berücksichtigung Brutto-/Netto-Personalbedarf.¹
- b) Wertmäßiger Eigenfertigungsanteil²

Mit der Berechnung des Personalbedarfs in Abhängigkeit von

- der Komponentenart
- des Automatisierungsgrads
- der Komplexität der Komponente
- der Linien- und Schichtenanzahl
- dem wertmäßigen Eigenfertigungsanteil
- der Unterscheidung Brutto-/Netto-Bedarf
- der Mitarbeiterart

ist der Informationspfad 2 abgeschlossen.

6.3 Methodik der Komplexitätsmatrix

6.3.1 Herangehensweise

Im ELAB-Projekt werden beispielhafte Fahrzeugkonzepte betrachtet (siehe Kapitel 6.1). Der für die Herstellung der Komponenten erforderliche Arbeitsaufwand kann sich zwischen den Antriebsstrangkonzeppten unterscheiden. Der Arbeitsaufwand wird aus diesem Grund unter Berücksichtigung der Variationsanzahl und Komplexi-

¹ Die Definitionen und Beschreibungen hierzu wurden bereits im vorherigen Kapitel dargestellt.

² Die Definitionen und Beschreibungen hierzu wurden bereits im vorherigen Kapitel dargestellt.

tät der Komponenten und den damit verbundenen Fertigungs- bzw. Montageprozessen durch einen prozentualen Ab-/Aufschlag von einer definierten Komponentenspezifikation (Basiskomponente) bedacht.

Für die (Arbeits-)Aufwandsbestimmung wird der Personalbedarf einer jeweiligen Basiskomponente bezogen auf einen bestimmten Leistungskennwert bzw. Komponentenspezifikation als 100% Arbeitsaufwand definiert, und auf die davon abweichenden Komponentenvarianten umgelegt. Die hierfür erhobenen Werte stammen aus Expertengesprächen bei Unternehmen, welche in der Herstellung der betrachteten Komponenten tätig sind. Die nachfolgende Tabelle stellt die Komponenten mit der zugehörigen Spezifikation dar, welche als Basiswerte für die spätere Bestimmung der Abweichungen der Personalbedarfe verwendet werden.

Komponente	Basis (100%)	Quelle/Erhebung
Verbrennungsmotor	4 Zylinder, 100 kW	Experteninterview
Getriebe (außer Hybrid)	8-Gang, Automatik	Experteninterview
Hybridgetriebe	8-Gang	Experteninterview
Hochleistungs-Batteriesystem	5 kWh	Experteninterview
Hochenergie-Batteriesystem	20 kWh	Experteninterview
Elektromotor / Elektrischer Generator	100 kW	Experteninterview
Elektromotor Hybrid	30 kW	Experteninterview
Leistungselektronik	100 kW	Experteninterview
Brennstoffzellen-System	100 kW	Experteninterview
H ₂ -Tank	2 kg	Experteninterview

Tabelle 14: Übersicht über Basiskomponenten und deren Spezifikationen

Am Beispiel der 5 C eines Verbrennungsmotors lässt sich die beschriebene Vorgehensweise verdeutlichen. Demzufolge wird der Arbeitsaufwand für einen 100 kW Verbrennungsmotor (4-Zylinder) als 100 Prozent Arbeitsaufwand definiert. Besitzt der Antriebsstrang einen von dieser Spezifikation abweichenden Verbrennungsmotor, wie es bspw. im Konzept des REX (2-Zylinder, 40 kW Motor) der Fall ist, so wird überprüft, in wie weit die Herstellung dieses Motors einen höheren bzw. niedrigeren Arbeitsaufwand erfordert (siehe folgende Abbildung).

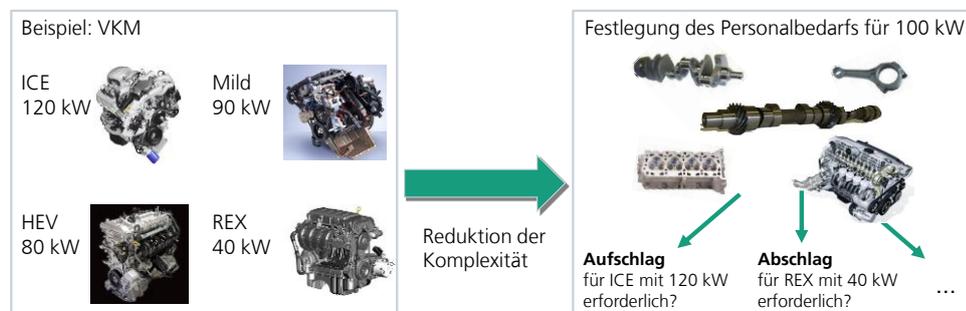


Abbildung 78: Methodisches Vorgehen am Beispiel der 5 C (Grafik: Fraunhofer IAO)

Bei den konventionellen Komponenten (Verbrennungsmotor, Getriebe (außer Hybrid) sowie Hybridgetriebe) findet keine Betrachtung der Standortumgebung statt. D.h. Komponenten, die nicht in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion hergestellt werden, wie bspw. ein zusätzlicher Turbolader für den 120 kW Motor, werden nicht in die Basis (100%) einberechnet. Stattdessen werden die zusätzlichen Montageschritte bspw. bei einem 120 kW Motor durch einen zusätzlichen Turbolader durch einen prozentualen Aufschlag berücksichtigt.

Bei den neuen Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs (Batteriesystem, Elektrische Maschine, Leistungselektronik sowie Brennstoffzellen-System und H₂-Tank) erfolgt eine Betrachtung der Standortumgebung. Hierbei wird der wertmäßige Eigenfertigungsanteil der jeweiligen Komponenten unter idealtypischen Gesichtspunkten dargestellt. Für die spätere Analyse der Standortumgebung lassen sich dann diese im Vorfeld bestimmten Werte verändern und ermöglichen somit eine Aussage über die Beschäftigungseffekte unter veränderten Bedingungen.

6.3.2 Beurteilungskriterien

Um eine Aussage über die Komplexität und den damit einhergehenden Arbeitsaufwand bei den betrachteten Komponenten des Antriebsstrangs zu treffen ist es erforderlich, **Beurteilungskriterien** zu definieren. Die Auswahl dieser Kriterien beruht zum einen auf eigenen Recherchen sowie auf durchgeführten Experteninterviews. Diese lassen sich, je nach betrachteter Komponente, zur Entscheidungsfindung heranziehen. Im Folgenden werden die für die Bewertung erforderlichen Kriterien beschrieben. In einem zweiten Schritt (Kapitel 6.3.3) erfolgt die Überführung dieser Kriterien auf die in den verschiedenen Antriebsstrangkonzepthen verbauten Komponenten und damit die Beschreibung der Abweichungen der Personalbedarfe.

Die **Bauteileanzahl** und die damit verbundene **Bauteilkomplexität** stellen wesentliche Beurteilungskriterien dar, welche sich in der Regel direkt auf die zur Herstellung oder Montage der betrachteten Komponente erforderlichen **Prozessschritte** auswirken. Zum einen können durch eine reduzierte Bauteileanzahl die manuellen Bearbeitungsschritte weniger aufwändig sein oder in manchen Fällen sogar gänzlich wegfallen. Als Beispiel lässt sich hier ein Getriebe für ein batterieelektrisches Fahrzeugkonzept im Vergleich zu einem automatisierten mehrstufigen Getriebe für einen konventionellen Verbrenner anführen.

Weiterhin lassen sich in bestimmten Fällen auch die **Herstellkosten** bzw. der **Herstellungsumfang** von Komponenten zur Bestimmung der Abweichungen in den Personalbedarfen heranziehen. Deutlich wird dies am Beispiel der Leistungselektronik. Diese kann sich je nach Antriebsstrangkonzepth unterscheiden. Dabei werden andere oder mehr Bauteile benötigt oder aufwändigere Schaltungen müssen realisiert werden, was sich wiederum in einem erhöhten Arbeitsaufwand niederschlägt. Beispielsweise ist bei einem Brennstoffzellen-Fahrzeug, anders als bei einem rein batterieelektrischen Fahrzeug, ein zusätzlicher Hochvolt-Gleichspannungswandler erforderlich, welcher für die „Anpassung“ der sehr variablen Ausgangsspannung der Brennstoffzelle notwendig ist.

Auch die **Größe** oder das **Gewicht** kann bei manuellen Tätigkeiten in der Montage unter Umständen zu einer Abweichung des Arbeitsaufwands führen. Können Handhabungstätigkeiten auf Grund dieser Faktoren nicht mehr manuell erfolgen, so werden intelligente Automatisierungslösungen realisiert, welche die menschliche Arbeitskraft zum Teil oder sogar vollständig ersetzen.

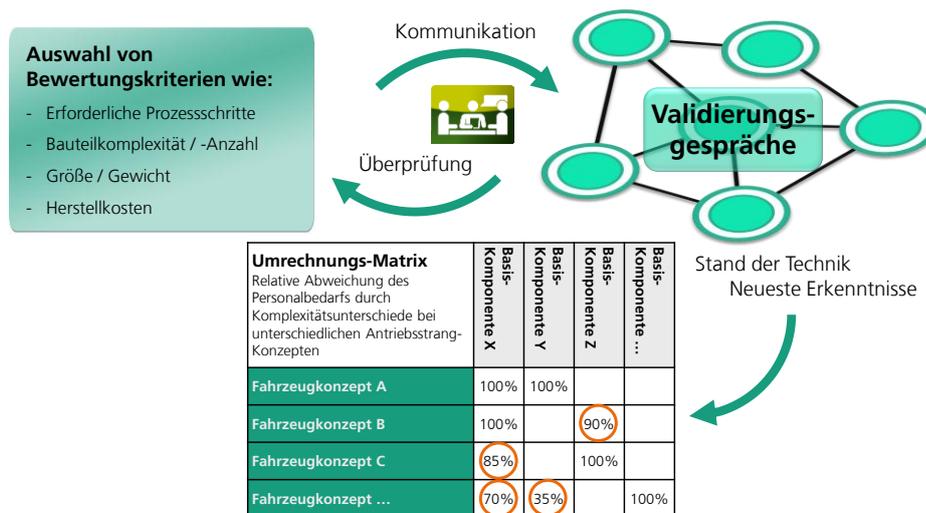


Abbildung 79: Vorgehensweise bei der Bestimmung von Abweichungen des Personalbedarfs (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.3.3 Abweichungen des Personalbedarfs bei den betrachteten Komponenten

Mittels der durchgeführten Experteninterviews konnten für bestimmte Komponentenspezifikationen direkt die Personalbedarfe erhoben werden. Diese sogenannten Basiskomponenten konnten dann als weitere Grundlage zur Bestimmung der Abweichung in den Personalbedarfen herangezogen werden. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Komponenten in den im Vorfeld definierten Antriebsstrangkonzepthen hinsichtlich der Abweichung des Personalbedarfs bzw. Arbeitsaufwands näher betrachtet.

6.3.3.1 Verbrennungsmotor

Beim Verbrennungsmotor werden die (Eigen-)Fertigung der 5 C sowie die komplette Montage des Verbrennungsmotors betrachtet, da diese Prozesse in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion abgebildet werden sollen. Als **Basis für die Personalermittlung** (100%) wurde ein **4-Zylinder Verbrennungsmotor** mit einer Leistung von **100 kW** gewählt.

Während sich beim **90 kW** Motor des **Mild-Hybrid** auf Grund der sehr ähnlichen Aufbauten (ebenfalls 4-Zylinder) und den dafür erforderlichen Prozessschritten keine Abweichungen im Personalbedarf (im Vgl. zum 100 kW Motor) einstellen, lassen sich bei den Konzepten des ICE, HEV und REX Unterschiede feststellen. Diese beruhen maßgeblich auf der höheren Bauteileanzahl bzw. kleineren Motorgröße.

Beim **ICE** kommt die Montage eines Turboladers zu der Basiskonfiguration (100 kW Motor) hinzu. Demgegenüber weisen HEV und REX weniger Arbeitsschritte auf. Werden beispielsweise beim Konzept des **HEV** noch **3-Zylinder** verbaut, so besitzt der **REX** lediglich **2-Zylinder**. Dies bewirkt zum einen eine geringere Teile- und Prozesskomplexität und eine damit einhergehende Verringerung in den manuellen Bearbeitungsschritten, welche sich von der Zylinderkopfvormontage bis hin zur finalen Endmontage kleinerer Bauteile am Verbrennungsmotor erstreckt.

6.3.3.2 Getriebe

Das **8-Gang Automatikgetriebe** findet Einsatz im Konzept des **ICE**. Bei den Konzepten des **REX**, **BEV** und auch in dem des **FCV** wird ein **zweistufiges Automatikgetriebe** verwendet. Dieses unterscheidet sich maßgeblich von dem aufwändigeren 8-Gang Getriebe. Eine geringere Bauteilanzahl führt zu einer Reduktion in der Prozesskomplexität, niedrigere Kosten schlagen sich in einem deutlich niedrigeren Arbeitsaufwand in der Herstellung dieser Komponente nieder. Der Abschlag bei dieser Komponente liegt, basierend auf den beschriebenen Beurteilungskriterien, bei 65 Prozent im Vergleich zur Basiskomponente (8-Gang Automatikgetriebe).

Dabei wird der Ansatz verfolgt, von Beginn der Betrachtung an ein zweistufiges Getriebe (an Stelle eines noch einfacheren einstufigen Getriebes) für die Konzepte des REX, BEV sowie FCV zu wählen. Etwaige Überlegungen, erst bei höheren Produktionszahlen zweistufige Getriebe herzustellen, wurden nicht angestellt, da erst bei den höheren Stückzahlen der Einfluss dieser Komponenten und die damit einhergehenden Veränderungen im Arbeitsaufwand zum Tragen kommen.

Die betrachtete Komponente des **8-Gang Hybridgetriebes** kommt in den Konzepten des **Mild-Hybrid** und des **HEV** zum Einsatz. Dabei unterscheiden sich die Getriebe maßgeblich hinsichtlich der Positionierung im Antriebsstrang und der verwendeten Motorsteuerung, welche an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden muss. Ein Auf- bzw. Abschlag beim Personalaufwand ist aus diesem Grund nicht erforderlich.

6.3.3.3 Batteriesystem

In den Konzepten des **Mild-Hybrid**, dem **HEV** sowie dem **FCV** wird zur Energiespeicherung ein **Hochleistungs-Batteriesystem** eingesetzt. Da sich zwar bei den Antriebsstrangkonzepten die Größe (Kapazität) des Batteriesystems unterscheiden (2 kWh im Vergleich zu 5 kWh), die Prozessschritte zur Herstellung jedoch identisch sind, lassen sich in der Fertigung dieser Komponente keine Abweichungen beim Arbeitsaufwand aufzeigen. Auch bei der anschließenden Modul- und Systemmontage ähnelt sich der Arbeitsaufwand bei den recht kleinen Batteriesystemen, sodass ein deutlicher „Mehraufwand“ erst durch eine weiter gesteigerte Anzahl an Batteriezellen bzw. -Modulen entsteht.

Beim **Hochenergie-Batteriesystem**, welches in den Konzepten des **REX** und **BEV** zum Einsatz kommt, kann ebenfalls keine Abweichung im Personalbedarf ausgewiesen werden. Die Batterie-Kapazität beim BEV (**25 kWh**) weicht zwar von der Referenzkomponente mit **20 kWh** ab, allerdings sind auch hier die Prozessschritte in der Fertigung der Zellen und der Montage des Systems identisch und mit ähnlichem Aufwand durchzuführen.

6.3.3.4 Elektrische Maschine

Beim **Elektromotor** stimmt die Basiskomponente mit den verbauten Motoren in den Konzepten des **REX**, **BEV** sowie des **FCV** überein. In allen drei Fahrzeugen kommt die Referenzbauteil, ein **100 kW Elektromotor** zum Einsatz. Eine Betrachtung von Auf- bzw. Abschlägen in der Herstellung dieser Komponenten ist somit nicht erforderlich.

Im Konzept des **REX** wird zusätzlich zum 100 kW Elektromotor eine weitere elektrische Maschine in der Funktion eines **elektrischen Generators** benötigt. Dieser

weicht auf Grund der kleineren Leistungsausführung (**40 kW**) von der Basiskomponente mit **100 kW** Leistung ab. Dies wird durch einen Abschlag im Arbeitsaufwand von 15 Prozent berücksichtigt. Der relativ geringe Abschlag resultiert aus der Tatsache, dass trotz der geringeren Anzahl an Blechpaketen und der Variation des Stator- oder Rotoraufbaus (Länge, Durchmesser) die Bestrebung besteht, ähnliche oder identische Werkzeuge einzusetzen. Dennoch lassen sich einige Prozessschritte beim Elektromotor (Traktions- oder Generatorfunktion) weniger stark automatisieren, was letztlich zu einer Abweichung im Arbeitsaufwand führt. Als Beispiel sind hier die nach den Wickelprozessen durchzuführenden manuellen Tätigkeiten bei der Kontaktierung (verteilte Wicklungen) zu nennen.

Der **Elektromotor Hybrid** findet Einsatz im Konzept des **Mild-Hybrid** und des **HEV**. Als Basiskomponente wurde hierfür eine Motorausführung mit einem Leistungswert von **30 kW** gewählt. Der Motor des Mild-Hybrid (**25 kW**) weicht wie auch der Antrieb des HEV (**55 kW**) von dieser Spezifikation ab. Da aber die Montage des Hybridmotors besser automatisierbar ist (konzentrierte Einzelzahnwicklungen am Stator), wird kein Auf- bzw. Abschlag beim Arbeitsaufwand vorgenommen.

6.3.3.5 Leistungselektronik

Bei der Leistungselektronik wird als **Referenzkomponente** ein **Umrichter** für einen **100 kW** Elektromotor herangezogen. Im Konzept des **Mild-Hybrid** ist ein Antrieb mit einer Leistung von **90 kW** vorgesehen. Für die hierfür benötigte Leistungselektronik ist eine im Vergleich zur Referenzkomponente leicht geringere Chipfläche notwendig. Durch den leicht reduzierten Arbeitsaufwand (weniger Lötverbindungen) wird ein Abschlag von 10 Prozent angenommen.

Das Konzept des **REX** erfordert neben dem Umrichter für den **100 kW** Traktionsmotor einen zusätzlichen Umrichter für den **40 kW** Generator. Da die elektrischen Maschinen vom konstruktiven Aufbau identisch sind, sich allerdings auch hier die Chipflächen und die erforderlichen Bauteile für die Leistungselektronik unterscheiden, wird hier ein Aufschlag für den Arbeitsaufwand von 80 Prozent festgelegt.

Beim **FCV** wird neben dem Umrichter für den **100 kW** Traktionsmotor ein weiterer Hochvolt-Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) benötigt. Dieser sorgt dafür, dass die sehr variable Ausgangsspannung der Brennstoffzelle an das jeweilig erforderliche Spannungsniveau angepasst wird. Der Aufwand in der Herstellung dieser Komponente ist gleich zu setzen mit dem des Umrichters und wird aus diesem Grund mit einem Aufschlag zur Referenzkomponente von 100 Prozent bewertet.

6.3.3.6 Brennstoffzellen-System

Bei der Komponente des Brennstoffzellen-Systems ist keine Anpassung des Arbeitsaufwands erforderlich. Das im Konzept des **FCV** eingesetzte System entspricht der Spezifikation der Basiskomponenten.

6.3.3.7 H₂-Tank

Der durch die Expertenbefragungen erhobene Arbeitsaufwand für den Wasserstoff-Tank (Hochdruck) basiert auf einer Tank-Ausführung mit einem Speichervolumen von **2 kg**. Um eine Reichweite von ca. 500 km oder mehr zu erlangen, wie es bei heutigen Brennstoffzellenfahrzeugen gewünscht ist, ist ein Tankvolumen von rund 4 kg erforderlich. Dabei unterscheidet sich jedoch der Arbeitsaufwand für die Her-

stellung eines 4 kg Tanks nur unwesentliche von dem Aufwand bei der Herstellung eines 2 kg Tanks, da dieselben Bearbeitungsschritte durchgeführt werden müssen. Allerdings bedingen Tanks in der Größenordnung von 4 kg einen sehr großen Baubedarf auf Grund der runden Form (zwecks Druckanforderungen). Die Folge ist hierbei, dass im Fahrzeug vermehrt 2-3 Tanks mit einem angepassten Tankvermögen von rund 1-3 kg verbaut werden.

Auch das Konzept des **FCV** sieht vor, dass zwei Tanks mit einer reduzierte Tankgröße von 2 kg verbaut werden. Für die Bestimmung des Arbeitsaufwandes werden die Ergebnisse aus den Expertenbefragungen mit dem Faktor 2 multipliziert, um die gewünschte **Tankgröße von 4 kg** abbilden zu können. Somit kann für die zwei benötigten Tanks ein Aufschlag von 100 Prozent angenommen werden.

6.3.4 Zusammenfassung der Analyse-Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel dargestellt. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens definierten Antriebsstrangkonzeppte (vertikale Anordnung) werden zur besseren Übersicht den sogenannten Basiskomponenten aus den Expertengesprächen (horizontale Anordnung) gegenübergestellt. Aufbauend auf dieser Matrixdarstellung sind nun die Ergebnisse der Analyse in Form der beschriebenen Prozentsätze ersichtlich, welche einen möglichen Auf- bzw. Abschlag im Arbeitsaufwand, immer bezogen auf die definierten Basiskomponenten, abbilden.

Relative Abweichung des Personalbedarfs durch Komplexitätsunterschiede bei unterschiedlichen Antriebsstrangkonzepnten	100 kW VKM	8-Gang-Automatikgetriebe	8-Gang-Hybridgetriebe	5 kWh Hochleistungs-Batteriesystem	20 kWh Hochenergie-Batteriesystem	100 kW Elektromotor	100 kW Elektrischer Generator	30 kW Elektromotor Hybrid	100 kW Leistungselektronik	100 kW Brennstoffzellen-System	2 kg H ₂ -Tank
ICE (120 kW VKM)	105%	100%									
Mild (90 kW VKM, 25 kW E-Mot., 2 kWh Li-Ion Rundzellen)	100%		100%	100%				100%	90%		
HEV (80 kW VKM, 55 kW E-Mot., 5 kWh Li-Ion Rundzellen)	85%		100%	100%				100%	100%		
REX (40 kW VKM, 40 kW elektr. Generator, 100 kW E-Mot., 20 kWh Li-Ion Pouch)	70%	35%			100%	100%	85%		180%		
BEV (100 kW E-Mot., 25 kWh Li-Ion Pouch)		35%			100%	100%			100%		
FCV (100 kW E-Mot., 4 kg H ₂ -Tank, 2 kWh Li-Ion Rundzellen)		35%		100%		100%			200%	100%	200%

Abbildung 80: Matrixdarstellung der erarbeiteten Ergebnisse (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.4 Auswertungspfad: Ermittlung des Personalbedarfs

Im Auswertungspfad werden die Daten der Informationspfade 1 (Produktionszahlen pro Jahr und Antriebsstrangkonzzept) und 2 (Personalbedarf pro Komponente für die Antriebsstrangkonzepete) zusammengeführt ausgegeben.

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Komponente VKM wertmäßiger Eigenfertigungsanteil: 20%					
Produktionszahlen x Komplexität	1.048.500	1.020.000	978.000	899.000	810.000
Direkte MA	1.773	1.909	1.773	1.636	1.364
Produktionsnahe indirekte MA	375	426	410	396	355
Indirekte MA	99	125	115	115	101
Summe MA	2.246	2.460	2.298	2.147	1.819

Produktionszahlen aus Informationspfad 1, gewichtet mit der Komplexität

Produktionsabhängiger Personalbedarf in Abhängigkeit der Mitarbeiterart aus Informationspfad 2

Abbildung 81: Zusammenführung der Informationspfade (Grafik: Fraunhofer IAO)

Abbildung 81 zeigt dies für die Komponente Verbrennungskraftmaschine. Die benötigte Anzahl an VKM-Einheiten in den betrachteten Jahren ist in der rot markierten Zeile eingetragen. Diese ist schon durch die Daten aus der Komplexitätsmatrix gewichtet. Die gewichteten Produktionsvolumen gehen in den Informationspfad 2 ein. Daraus ergeben sich die Personalbedarfe (grün markiert). Die komponentenspezifischen Personalbedarfe pro Jahr stellen ein Zwischenergebnis dar (Abbildung 82 zeigt dies beispielhaft grafisch).

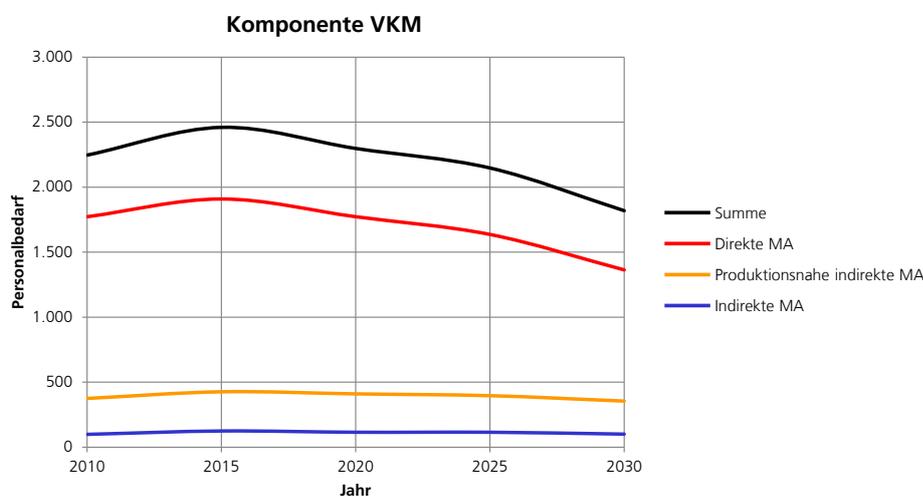
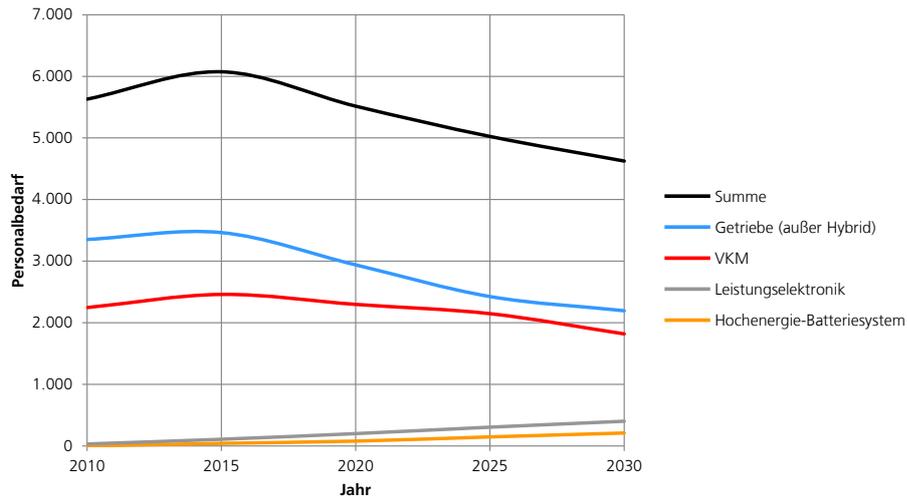


Abbildung 82: Darstellung Personalbedarf pro Komponente (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die Zwischenergebnisse (Personalbedarf pro Komponente) werden in einem letzten Schritt summiert. Abbildung 83 zeigt einzelne Gesamtpersonalbedarfe und deren Summe für eine beispielhafte Auswahl an Komponenten.



Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
Komponente VKM wertmäßiger Eigenfertigungsanteil: 20%					
Summe MA	2.246	2.460	2.298	2.147	1.819
Komponente Getriebe (außer Hybrid) wertmäßiger Eigenfertigungsanteil: 45%					
Summe MA	3.352	3.463	2.939	2.425	2.195
Komponente Hochenergie-Batteriesystem wertmäßiger Eigenfertigungsanteil: 25%					
Summe MA	0	42	78	147	210
Komponente Leistungselektronik wertmäßiger Eigenfertigungsanteil: 55%					
Summe MA	32	108	200	305	401
Summe	5.630	6.074	5.515	5.024	4.624

Abbildung 83: Darstellung Gesamtpersonalbedarf (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die Gesamtauswertung kann für jedes ELAB-Szenario einzeln durchgeführt werden.

Bisher bezogen sich alle Auswertungen auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion. Im ELAB-Projekt wird auch die Standortumgebung betrachtet. Die Auswertungen für die idealtypische Antriebsstrangproduktion können auch für die Standortumgebung durchgeführt werden. Das angewandte Rechenmodell nimmt an, dass sich die gesamte Wertschöpfung auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion und auf die Standortumgebung verteilt. Je geringer der zuvor definierte wertmäßige Eigenfertigungsanteil ist, desto höher wird der Wertschöpfungsanteil der Standortumgebung.

Die Auswertung und Darstellung von

- den Personalbedarfen pro Komponente
 - dem Gesamtpersonalbedarf
 - dem Personalbedarf der Standortumgebung
- beendet den Auswertungspfad und stellt das Endergebnis dar.

6.5 Personalbedarf in der Antriebsstrangproduktion

Durch Anwendung der zuvor erläuterten Vorgehensweisen und Methoden lassen sich Personalbedarfe ermitteln und analysieren. Die Ergebnisse sind in diesem Kapitel ausgewiesen. Dabei liegt der Fokus der nachfolgenden Abschnitte auf der idealtypischen Antriebsstrangproduktion, weswegen sämtliche im Rahmen des ELAB-Projekts

berücksichtigten Komponenten in die Berechnungen mit einbezogen werden. Die Betrachtung einer nicht-idealtypischen Antriebsstrangproduktion, in der Komponenten außen vor bleiben, findet im Kapitel 6.6 statt.

Vor der Präsentation der gewonnenen Daten fasst Kapitel 6.5.1 alle Annahmen zusammen, die in den bisherigen Ausführungen beschrieben sind und bei den angestellten Untersuchungen getroffen wurden.

6.5.1 Zusammenfassung der getroffenen Annahmen

Annahmen Produktionsvolumen

- Produktionsvolumen von 1 Million Fahrzeug-Antriebssträngen pro Jahr in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion
- Idealtypische prozentuale Aufteilung des Produktionsvolumens, d.h. gemäß dem jeweiligen ELAB-Szenario (Referenz-, BEV-, FCV-, ICE-Szenario)
- Die Menge, in der Komponenten hergestellt werden können, steigt linear mit der Linienanzahl (Prämisse: gleicher Standort)

Annahmen Komponenten und Komponentenunterschiede

- Zur Berücksichtigung der Unterschiede zwischen den Komponenten in den Antriebsstrangkonzepthen der betrachteten Szenarien und den in den Interviews spezifizierten Komponentenausprägungen wurden Faktoren angesetzt (Komplexitätsmatrix), um die Komplexitätsunterschiede berücksichtigen zu können
- Die Komponenten werden jeweils „auf denselben Fertigungslinien“ hergestellt (außer bei gravierenden Unterschieden, beispielsweise zwischen einem 4- oder 3-Zylinder VKM zu einem 2-Zylinder VKM, oder einem 8-Gang-(Hybrid-)Getriebe zu einem 2-Gang-Getriebe)
- Für die Komponenten wird abhängig vom Produktionsvolumen jeweils der Automatisierungsgrad (niedrig oder hoch) gewählt, der zum geringeren Personalbedarf führt (Prämisse: gleicher Standort)

Annahmen Berechnung Personalbedarf

- Der Personalbedarf steigt bei allen Mitarbeiterarten sprunghaft pro Linie (Prämisse: gleicher Standort)
- Der Personalbedarf an direkten MA entwickelt sich über mehrere Linien linear, der Bedarf an produktionsnahen indirekten MA und an indirekten MA entwickelt sich degressiv (Prämisse: gleicher Standort)
- Der analysierte Personalbedarf bezieht sich nur auf den direkten Produktionsbereich. Standortfunktionen, allgemeine Logistik, Wartung, Verwaltung, etc. werden nicht berücksichtigt
- Die Ermittlung von Personalbedarfen bei Produktionsvolumen, welche zwischen den empirisch erhobenen und recherchierten Daten liegen oder darüber hinausgehen, erfolgt durch Inter- und Extrapolation
- Die Inter- und Extrapolation erfolgt unter Berücksichtigung der definierten Annahmen, bspw. Veränderung des Personalbedarfs bei mehreren Linien

Annahmen zum Schichtbetrieb

- In der Antriebsstrangproduktion besteht die Möglichkeit, außer im 3-Schicht- auch im 2- oder 1-Schicht-Betrieb zu arbeiten, sofern dies zu einem geringeren Personalbedarf führt
- Bei mehreren Linien arbeitet nur maximal eine Linie je Komponente im 2- oder 1-Schicht-Betrieb, sofern dies zu einem geringeren Personalbedarf führt. Die anderen Linien werden in Vollaustattung gefahren, da sonst per Definition (niedrigster Personalbedarf) keine zusätzliche Linie (im 1-, 2- oder 3-Schichtbetrieb) notwendig wäre

6.5.2 Referenzszenario

Als erstes der vier definierten ELAB-Szenarios wird das Referenzszenario ausgewertet. Der in diesem Fall in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen entstehende Gesamtbedarf an direkten, indirekten und produktionsnah indirekten Mitarbeitern ist in Abbildung 84 dargestellt. Anschließend erfolgt eine detailliertere Untersuchung, welcher Bedarf bei den einzelnen Mitarbeiterarten in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen jeweils vorliegt. Idealtypisch heißt in diesem Fall: Die Untersuchung geht stets von einer Produktion aus, bei der Effekte wie Verteilung und Verlagerung der Wertschöpfung auf verschiedene Unternehmen und Standorte nicht untersucht werden.

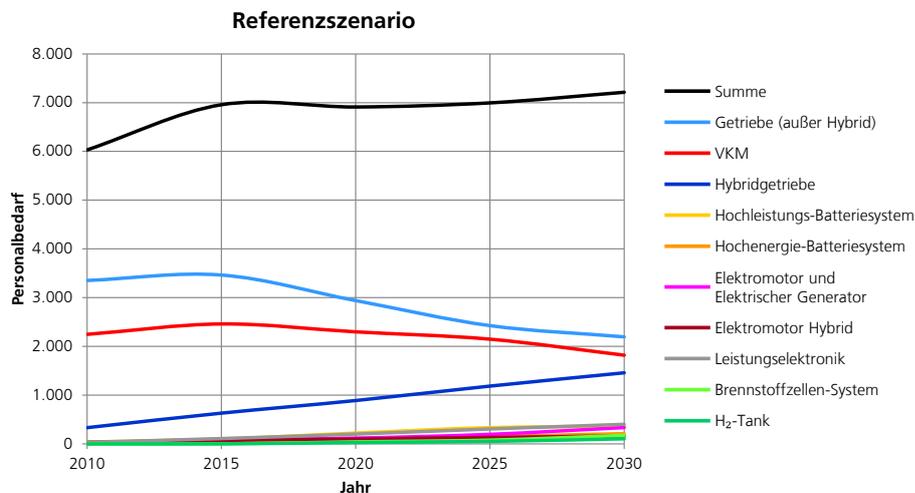


Abbildung 84: Personalbedarf im Referenzszenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

Beim Mitarbeiterbedarf sind drei abgrenzbare Zeitphasen erkennbar.

- Die erste Phase läuft von 2010 bis 2015 und ist durch einen Anstieg des Gesamtbedarfs gekennzeichnet. Die Bedarfe der konventionellen Komponenten Getriebe (außer Hybrid) und Verbrennungskraftmaschine steigen leicht, während neue Komponenten hinzukommen. Die leichte Steigerung des Personalbedarfs bei den konventionellen Komponenten entsteht dadurch, dass die weiterhin hohen Produktionszahlen für ICE, Mild und HEV um die Verbrennungskraftmaschine für REX sowie um das Getriebe (außer Hybrid) für REX und BEV ergänzt werden. Diese bedürfen jeweils aufgrund geringer Stückzahlen und damit noch nicht realisierbarer Massendegressionsvorteile (noch keine „Economies of Scale“) einen Grundbedarf an Personal. Daher steigt der Personalbedarf der konventionellen Komponenten trotz des sehr kleinen Marktanteils der Konzepte BEV und REX (zusammen 3% in 2015).
- Von 2015 bis 2020 steigen die Bedarfe der neuen Komponenten weiter an, jedoch kommt es zu einer Abnahme bei den konventionellen Komponenten (außer Hybridgetriebe). Der Gesamtbedarf fällt leicht.
- In der dritten Phase (2020 bis 2030) erfährt die Komponente Hybridgetriebe eine stärkere Steigerung, die den Wegfall beim Getriebe (außer Hybrid) kompensiert. Die sonstigen neuen Komponenten steigen alle leicht stärker. Dies führt zu einer minimalen Steigerung des Gesamtpersonalbedarfs.

Der Gesamtpersonalbedarf bewegt sich zwischen 6.000 und 7.200.

Eine feinere Analyse ermöglicht die relative Betrachtungsweise. Abbildung 85 beschreibt, welcher prozentuale Anteil der Mitarbeiter pro Zeitperiode für welche Komponente im Referenzszenario eingesetzt wird. Die absolute Veränderung des Gesamtpersonalbedarfs wurde also ignoriert, um Bewegungen in der Verteilung deutlich darzustellen.

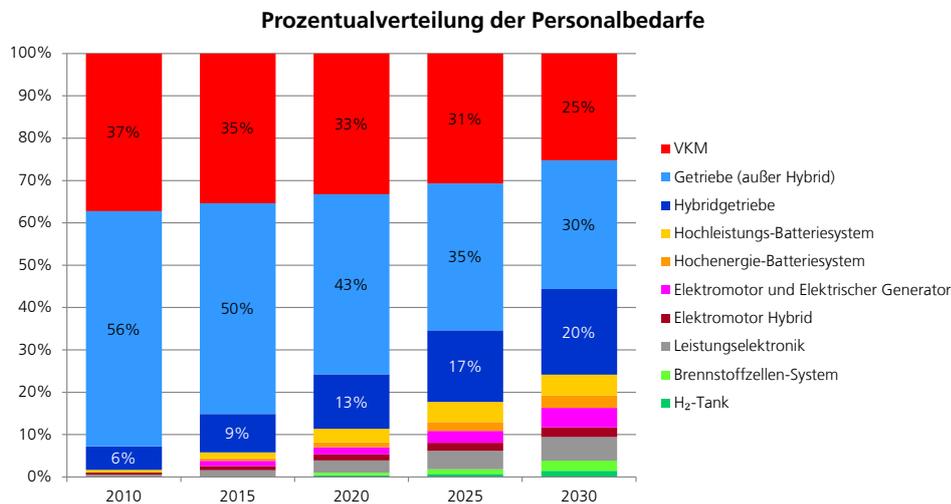


Abbildung 85: Prozentuale Verteilung der Personalbedarfe (Grafik: Fraunhofer IAO)

Bei der prozentualen Verteilung fällt auf, dass die Personalbedarfe der für das ICE-Antriebsstrangkonzzept relevanten Komponenten VKM und Getriebe (außer Hybrid) von 2010 bis 2030 von 93% auf 55% fallen. Der relative Rückgang des Personalbedarfs der Komponente Getriebe (außer Hybrid) wird dabei nicht von der relativen (über die Zeit stetigen) Zunahme bei der Komponente Hybridgetriebe kompensiert. Diese Komponente weist 2030 einen Anteil von 20% am Gesamtpersonalbedarf auf, währenddessen der relative Personalbedarf der Komponente Getriebe (außer Hybrid) um 26% fällt.

Die Personalbedarfe der neuen Komponenten wachsen über den betrachteten Zeitraum von einem vernachlässigbaren Anteil auf ca. 25%. Trotz des im Referenzszenario ausgewiesenen Verhältnisses von ICE-Antriebsstrangkonzzepten zu alternativen Konzepten im Jahr 2030 (40% zu 60%) ist der Anteil der Komponenten VKM und Getriebe (außer Hybrid) weit höher als 40%, da diese Komponenten auch in anderen Antriebsstrangkonzzepten erforderlich sind. Das bedeutet auch, dass der anteilige Personalbedarf für die Produktion der für die alternativen Antriebsstrangkonzpte notwendigen Komponenten weit unter dem Anteil dieser Konzepte im Referenzszenario im Jahr 2030 (60%) zurückbleibt (neue Komponenten inkl. Hybridgetriebe haben 2030 einen Anteil am Personalbedarf von ca. 45%). Eine Ursache hierfür sind die im ELAB-Projekt angenommenen Prozessschritte bei der Herstellung der Komponenten Hochleistungs- und Hochenergie-Batteriesystem, Elektromotoren sowie Leistungselektronik. Die zur Herstellung erforderlichen Abläufe jener Komponenten sind grundsätzlich weniger arbeitsintensiv als die Abläufe bei den konventionellen Komponenten. Hingegen deckt sich der relative Anteil der Personalbedarfe der exklusiv für Brennstoffzellenfahrzeuge nötigen Komponenten Brennstoffzellen-System und H₂-Tank in jedem Jahr nahezu mit jenem des FCV-Antriebsstrangkonzpts im ELAB-Referenzszenario. Das heißt, dass die Produktion von FCV-Antriebssträngen hier nahezu keine relative Veränderung des Personalbedarfs der nur für die FCV nötigen Komponenten mit sich bringt. Berücksichtigt man die für die FCV-Antriebsstränge

außerdem erforderlichen Komponenten, zeigt sich erneut der hohe Personalbedarf dieses Antriebsstrangkonzeppts.

Analog wurde die Verteilung auf Mitarbeiterarten untersucht.

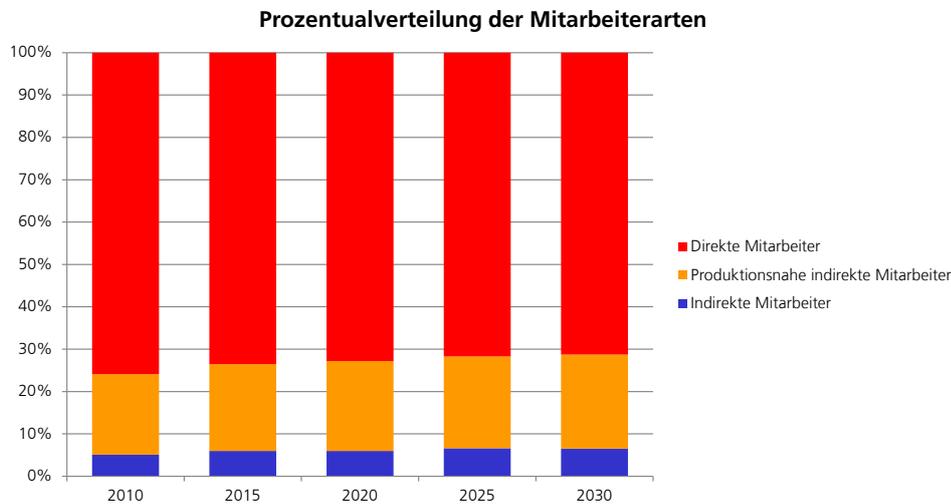


Abbildung 86: Prozentuale Verteilung der Mitarbeiterarten (Grafik: Fraunhofer IAO)

Der Anteil der direkten Mitarbeiter fällt während des betrachteten Zeitraums von 76% auf 71%. Während die Produktionszahlen der neuen Komponenten steigen und damit ein höherer Automatisierungsgrad erreicht wird, fallen die Produktionszahlen der konventionellen Komponenten (außer Hybridgetriebe) von einem hohen Niveau (siehe Abbildung 70), weswegen deren Automatisierungsgrad nicht reduziert wird. Insgesamt ergeben sich damit ein höherer durchschnittlicher Automatisierungsgrad am Ende der Betrachtungsdauer und damit ein höherer Anteil indirekter und produktionsnaher indirekter Mitarbeiter.

Nachfolgend wird auf den absoluten Bedarf an direkten, indirekten und produktionsnahen indirekten Mitarbeitern eingegangen.

6.5.2.1 Direkte Mitarbeiter

Der in Abbildung 87 visualisierte Verlauf der direkten Mitarbeiter ist analog zu dem des Gesamtpersonalbedarfs in Abbildung 84, da der Anteil der direkten Mitarbeiter im Vergleich zu den sonstigen Mitarbeiterarten sehr hoch ist.

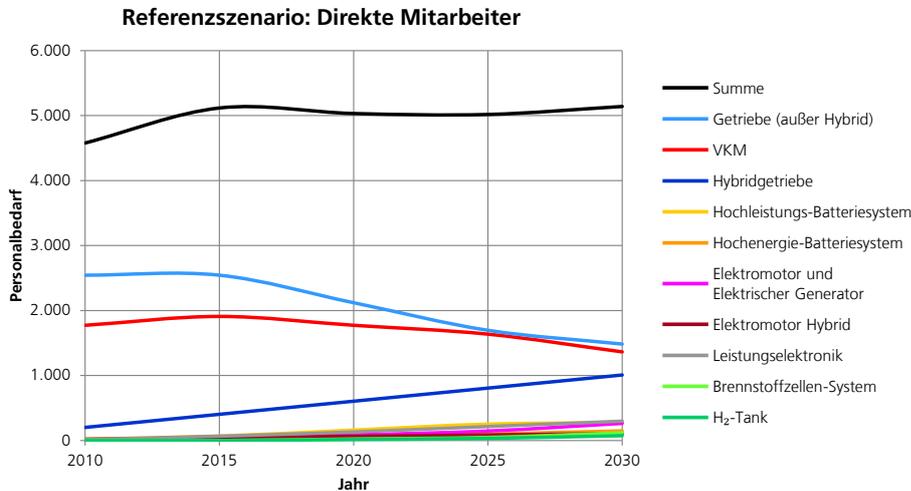


Abbildung 87: Analyse der direkten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO)

Der Bedarf der direkten Mitarbeiter im Referenzszenario und unter Berücksichtigung aller Komponenten liegt zwischen 4.500 und 5.200. Das durchschnittliche Verhältnis direkter zu sonstigen Mitarbeitern beträgt 73%.

6.5.2.2 Indirekte Mitarbeiter

Den Verlauf des Personalbedarfs an indirekten Mitarbeiter zeigt Abbildung 88.

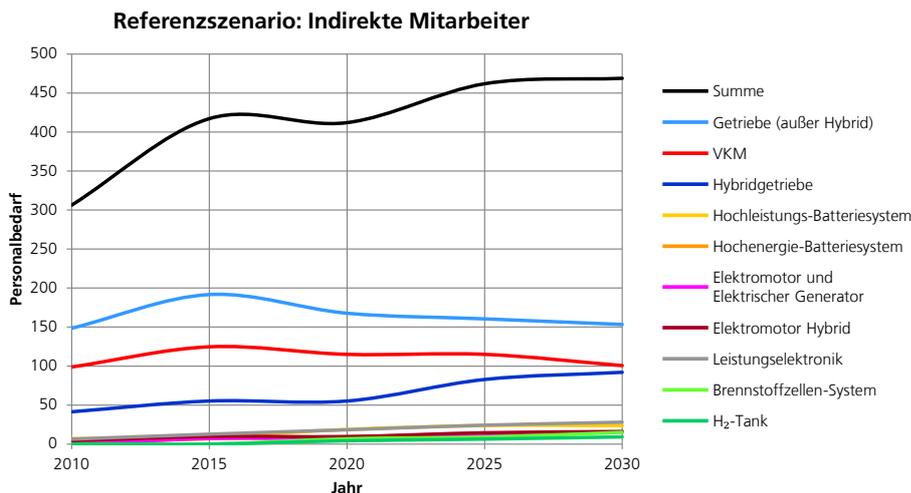


Abbildung 88: Analyse der indirekten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO)

Beim Verlauf der indirekten Mitarbeiter ergeben sich drei Phasen.

- Von 2010 bis 2015 ist eine Steigerung um 36% zu verzeichnen. Der Hauptgrund hierfür ist ein Anstieg beim Personalbedarf der Komponente Getriebe (außer Hyb-

rid). Es zeigt sich, dass der Bedarf an indirekten Mitarbeitern bei dieser Komponente schneller wächst, als der Bedarf an direkten Mitarbeitern. Der Hintergrund dieser Entwicklung ist die Annahme, dass sich die Fertigung der Komponente Getriebe (außer Hybrid) auf zwei parallele Linien aufteilt. Da die Parallel-Linie eine geringere Stückzahl fertigt und bei dieser der Anteil der indirekten Mitarbeiter höher ist (degressiver Verlauf), ist der stärkere Anstieg des Bedarfs an indirekten Mitarbeitern nachvollziehbar.

- Von 2015 bis 2020 fällt der Bedarf der indirekten Mitarbeiter leicht, da weniger Einheiten der Komponente Getriebe (außer Hybrid) für das Fahrzeugkonzept ICE gefertigt werden müssen.
- In der dritten Phase (2020 bis 2030) erfährt die Komponente Hybridgetriebe eine Steigerung, die den Wegfall beim Getriebe (außer Hybrid) kompensiert. Die sonstigen neuen Komponenten steigen alle leicht. Dies führt zu einer minimalen Steigerung des Personalbedarfs der indirekten Mitarbeiter.

6.5.2.3 Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter

Der in Abbildung 89 dargestellte Verlauf der produktionsnahen indirekten Mitarbeiter ähnelt dem der indirekten Mitarbeiter, wobei die fallende Phase (2015 – 2020) abgedämpft wird. Stattdessen erfolgt hier eine geringe Steigerung des Personalbedarfs. Dies ist zum einen in der Zunahme der Produktionszahlen der neuen Komponenten begründet. Zum anderen erfolgt die Fertigung der Komponente Hybridgetriebe in der Phase 2015 bis 2020 im Dreischichtbetrieb, in dem der Personalbedarf an produktionsnahen indirekten Mitarbeitern gegenüber dem Zweischichtbetrieb nochmals steigt (im Gegensatz dazu ist der Personalbedarf an indirekten Mitarbeitern im Zwei- und im Dreischichtbetrieb gleich).

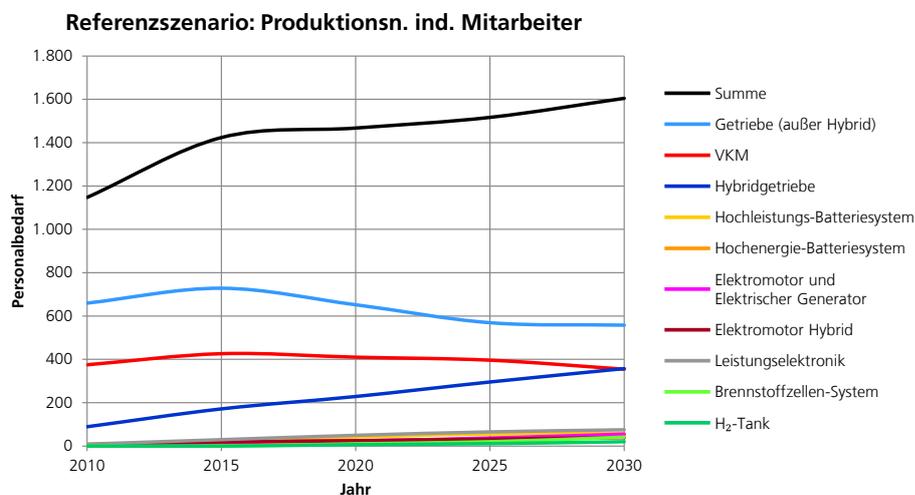


Abbildung 89: Analyse der produktionsnahen indirekten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.5.3 BEV-Szenario

Im BEV-Szenario, dessen Personalbedarf in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen in Abbildung 90 gezeigt ist, wird ein drastischer Rückgang des Antriebsstrangkonzpts ICE erwartet. Idealtypisch heißt in diesem Fall: Die Untersuchung geht stets von einer Produktion aus, bei der Effekte

wie Verteilung und Verlagerung der Wertschöpfung auf verschiedene Unternehmen und Standorte nicht untersucht werden. Zwei Phasen sind erkennbar:

- Von 2010 bis 2020 steigt der Gesamtpersonalbedarf an, da die Komponente Hybridgetriebe und die neuen Komponenten den Rückgang der Komponente Getriebe (außer Hybrid) überkompensieren. Bis 2020 fällt die Komponente Verbrennungskraftmaschine dagegen nur leicht.
- Ab 2020 fällt auch der Bedarf der Komponente Hybridgetriebe, da die Anteile der Antriebsstrangkonzeppte mit Hybridantrieb (Mild und HEV) zugunsten des Konzepts BEV abnehmen. Überdies fällt der Bedarf der Komponente Verbrennungskraftmaschine stärker als zuvor. Der Gesamtpersonalbedarf nimmt aus diesen Gründen ab, was auch nicht durch den Umstand kompensiert wird, dass der Personalbedarf für alle neuen Komponenten außer Hochleistungs-Batteriesystem und Elektromotor Hybrid steigt.

In diesem Szenario liegt der Gesamtmitarbeiterbedarf zwischen 6.000 und 7.400.

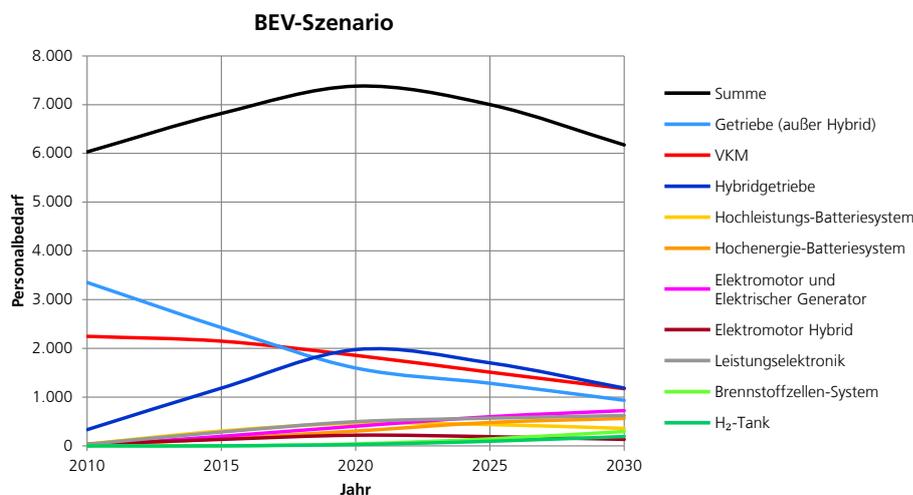


Abbildung 90: Personalbedarf im BEV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.5.4 FCV-Szenario

Den Personalbedarf in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen im FCV-Szenario veranschaulicht Abbildung 91. Idealtypisch heißt in diesem Fall: Die Untersuchung geht stets von einer Produktion aus, bei der Effekte wie Verteilung und Verlagerung der Wertschöpfung auf verschiedene Unternehmen und Standorte nicht untersucht werden. Es sind drei Phasen erkennbar.

- Von 2010 bis 2015 steigt der Gesamtpersonalbedarf, da der Rückgang bei der Komponente Getriebe (außer Hybrid) durch eine Steigerung bei der Komponente Hybridgetriebe ausgeglichen wird (vergleiche Produktionszahlen der Fahrzeugkonzepte in den ELAB-Szenarios). Insbesondere die Anstiege der Komponenten Leistungselektronik und Hochleistungs-Batteriesystem führen zu einer Erhöhung des Gesamtpersonalbedarfs.
- Von 2015 bis 2020 nimmt der Gesamtpersonalbedarf ab, da der Bedarf der Komponente Hybridgetriebe nun abnimmt.
- Ab 2020 steigen die Bedarfe der Komponenten Brennstoffzellen-System und Wasserstofftank merklich stärker als zuvor, was die sonstigen Abnahmen überwiegt.

Insgesamt schwankt der Mitarbeiterbedarf zwischen 6.000 und 7.800.

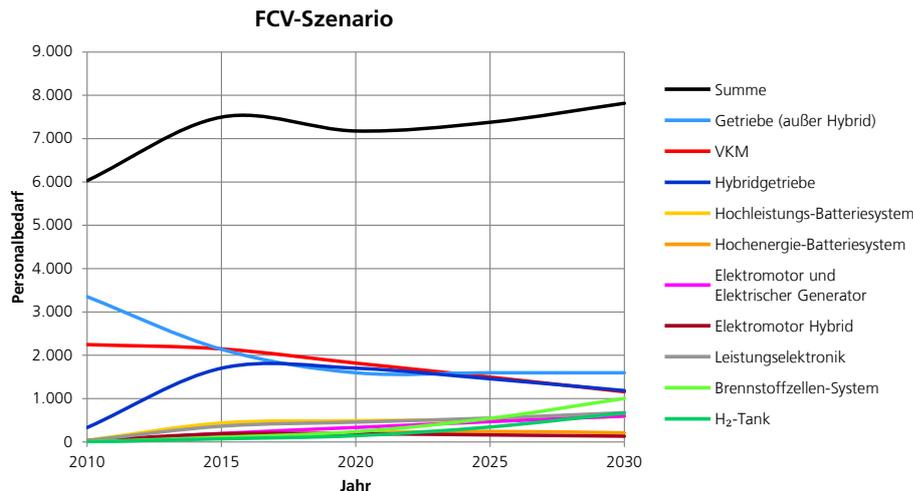


Abbildung 91: Personalbedarf im FCV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.5.5 ICE-Szenario

Den Personalbedarf in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen im ICE-Szenario veranschaulicht Abbildung 92. Idealtypisch heißt in diesem Fall: Die Untersuchung geht stets von einer Produktion aus, bei der Effekte wie Verteilung und Verlagerung der Wertschöpfung auf verschiedene Unternehmen und Standorte nicht untersucht werden. Es zeigt sich ein steter Anstieg des Gesamtmitarbeiterbedarfs, da hier den Fahrzeugkonzepten BEV, REX und FCV keine Relevanz zugesprochen wird und Hybridfahrzeuge einen leichten Anstieg zu Lasten des ICE-Konzepts erfahren. Dennoch sind zwei Phasen zu unterscheiden.

- Von 2010 bis 2015 ist kaum eine Veränderung bei den Bedarfen zu erkennen.
- Ab 2015 tritt eine stärkere Hybridisierung ein, was zu einem Anstieg des Bedarfs der Komponente Hybridgetriebe führt. Dieser wiegt den Rückgang bei der Komponente Getriebe (außer Hybrid) auf. Die Bedarfe der neuen Komponenten steigen leicht und mit ihnen der Gesamtpersonalbedarf.

Insgesamt liegt der Mitarbeiterbedarf zwischen 6.000 und 6.600.

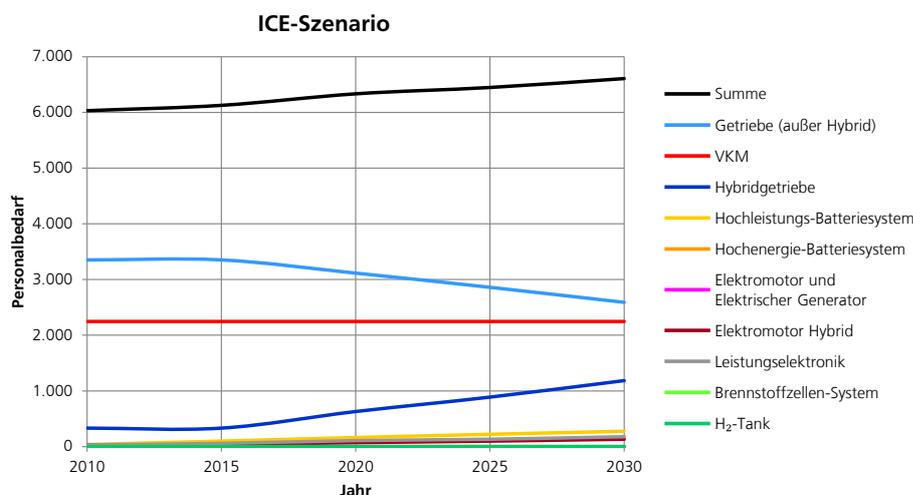


Abbildung 92: Personalbedarf im ICE-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.5.6 Vergleich der Szenarios

Um die Szenarios vergleichen zu können, wurden die Gesamtpersonalbedarfe in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion von jährlich einer Million Antriebssträngen in einer weiteren Betrachtung gegenübergestellt. Dies zeigt Abbildung 93. Idealtypisch heißt in diesem Fall: Die Untersuchung geht stets von einer Produktion aus, bei der Effekte wie Verteilung und Verlagerung der Wertschöpfung auf verschiedene Unternehmen und Standorte nicht untersucht werden.

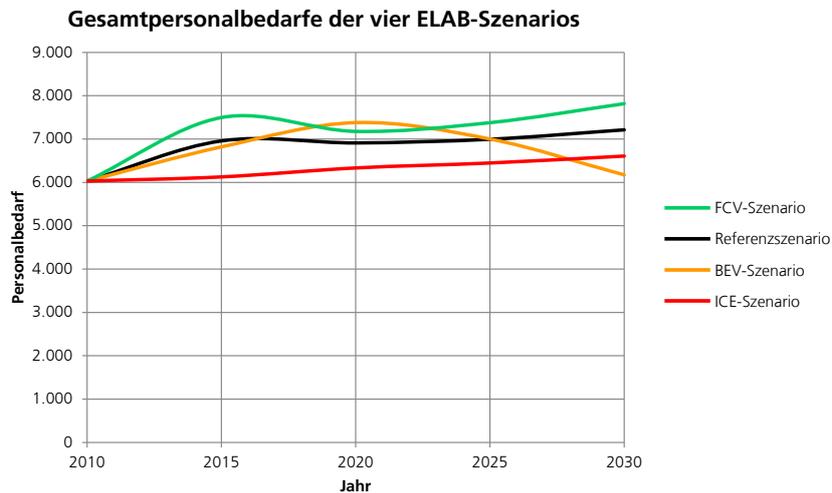


Abbildung 93: Vergleich der Gesamtpersonalbedarfe (Grafik: Fraunhofer IAO)

Drei Phasen lassen sich unterscheiden:

- Von 2010 bis ca. 2018 ist der Personalbedarf des FCV-Szenarios höher als bei den anderen ELAB-Szenarios. Ursächlich ist, dass für mehrere in diesem Szenario um das Jahr 2015 relevante Antriebsstrangkonzeppte alte und neue Komponenten parallel erforderlich sind (Mild, HEV, REX).
- Ab ca. 2018 steigt das BEV-Szenario zum personalintensivsten auf. Während im FCV-Szenario 2020 die ICE-Antriebsstränge und damit die arbeitsintensiven alten Komponenten stark reduziert werden und das arbeitsintensive FCV-Konzeppt noch keinen signifikanten Produktionsanteil besitzt (7%), kommen im BEV-Szenario nun die Antriebsstrangkonzeppte mit alten und neuen Komponenten zu einem erheblichen Produktionsanteil (wiederum Mild, HEV, REX).
- Ab ca. 2022 fällt der Gesamtpersonalbedarf des BEV-Szenarios stark, währenddessen FCV wieder anzieht. Der Hauptgrund ist die hohe Komplexität der Komponente Brennstoffzelle, die im FCV-Szenario in den Jahren 2025 und 2030 aufgrund der Verdopplung des Antriebsstrangkonzeppts FCV (19% und 40%) wichtiger wird

Es zeigt sich, dass es für den Gesamtpersonalbedarf stets ausschlaggebend ist, wie groß die Anteile der Antriebsstrangkonzeppte mit alten und neuen Komponenten sind (Mild, HEV, REX). Einzige Ausnahme besteht am Ende des Analysezeitraums, da hier im FCV-Szenario das stark arbeitsintensive FCV-Antriebsstrangkonzeppt einen Anteil von 40% erreicht.

Überraschend ist der stets vergleichsweise geringe Personalbedarf des ICE-Szenarios. Der Gesamtpersonalbedarf im Referenzszenario beträgt in den Jahren 2015, 2020, 2025 und 2030 etwa 93% des Gesamtpersonalbedarfs in dem Szenario, das in den verschiedenen Jahren jeweils den höchsten Personalbedarf aufweist (Gesamtpersonalbedarf im Referenzszenario: 6.957 in 2015, 6.911 in 2020, 6.995 in 2025, 7.213

in 2030; höchster Gesamtpersonalbedarf: FCV-Szenario mit 7.497 in 2015, BEV-Szenario mit 7.380 in 2020, FCV-Szenario mit 7.378 in 2025, FCV-Szenario mit 7.816 in 2030).

Es ergibt sich eine Rangfolge der Szenarien bezüglich der Gesamtpersonalbedarfe im abschließenden Jahr 2030:

Rangfolge nach Gesamtpersonalbedarf 2030

1.	FCV-Szenario	7.816
2.	Referenzszenario	7.213
3.	ICE-Szenario	6.607
4.	BEV-Szenario	6.173

Tabelle 15: Rangfolge nach Gesamtpersonalbedarf 2030

Das FCV-Szenario benötigt die meisten Mitarbeiter für eine Produktion von einer Million Antriebssträngen. Das Referenzszenario schneidet mit ca. 600 MA weniger auf dem zweiten Platz ab. Das Szenario mit Fokus auf ICE-Produktion bedarf ca. 600 MA weniger als das Referenzszenario. Schlusslicht ist das BEV-Szenario mit einem weiteren Wegfall von ca. 430 MA.

6.6 Nicht-idealtypische Antriebsstrangproduktion

In den nachfolgenden Abschnitten werden Personalbedarfe ermittelt und analysiert, die auf Grundlage des Referenzszenarios in einer nicht-idealtypischen Antriebsstrangproduktion entstehen. Dabei bedeutet nicht-idealtypisch, dass verschiedene im ELAB-Projekt berücksichtigte Komponenten wechselweise nicht in die Berechnungen einbezogen sind.

6.6.1 Annahmenkomplexe

Bei den Annahmenkomplexen wird zunächst davon ausgegangen, dass die nicht-idealtypische Antriebsstrangproduktion entweder nur auf die Herstellung von neuen Komponenten (Batteriesysteme, elektrische Maschinen, Leistungselektronik, Brennstoffzellen-System, H₂-Tank) oder nur auf die Herstellung der alten Komponenten (VKM, Getriebe) ausgelegt ist. Anschließend erfolgt die Konstruktion einer Antriebsstrangproduktion, in der alle alten und nur ein Teil der neuen Komponenten gefertigt werden. So gelingt die Simulation einer im Jahr 2010 gewohnten, nur für die alten Komponenten eingerichteten Antriebsstrangproduktion, die den bei Beibehaltung des Produktionsprogramms im Jahr 2030 zu erwartenden Rückgang des Personalbedarfs durch Hinzunahme neuer Komponenten abfängt (Stop-Loss).

In diesem Kapitel ist zu beachten, dass den Berechnungen die bereits in Kapitel 6.2.1 angeführten und erläuterten Stückzahlen zugrunde liegen. Deswegen kann die Menge der tatsächlich produzierten und abgesetzten Antriebsstränge nach unten von der im ELAB-Projekt definierten Produktionsvorgabe (1 Million Antriebsstränge) abweichen.

6.6.1.1 Annahmenkomplex „Neue Komponenten“

Abbildung 94 zeigt die Entwicklung des Personalbedarfs in der Antriebsstrangproduktion, die nur die neuen Komponenten fertigt.

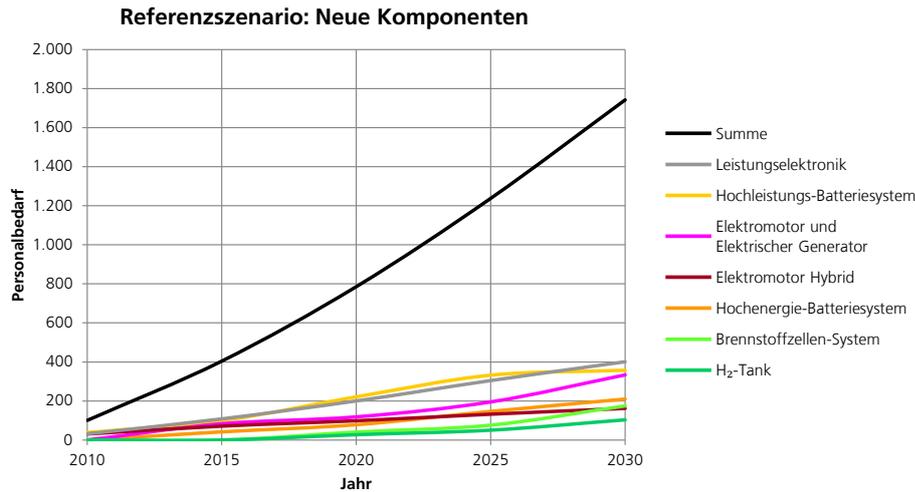


Abbildung 94: Personalbedarf beim Annahmenkomplex „Neue Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

Es ist nur eine zeitliche Phase erkennbar (2010 bis 2030). Die Personalbedarfe erfahren bei allen Komponenten eine Steigerung. Hervorzuheben ist die Leistungselektronik, die zu fast jedem Zeitpunkt einen höheren Personalbedarf als die restlichen Komponenten aufweist. Ab 2025 steigen die Bedarfe für Elektromotor und elektrischer Generator sowie für die Brennstoffzellen-Fahrzeug-Komponenten überdurchschnittlich stark an.

Insgesamt bewegt sich der Mitarbeiterbedarf zwischen 100 und 1800.

6.6.1.2 Annahmenkomplex „Alte Komponenten“

Dieser Annahmenkomplex, dessen Personalbedarf Abbildung 95 veranschaulicht, ist das Gegenteil des vorherigen („Neue Komponenten“). Es werden nur die konventionellen Komponenten gefertigt.

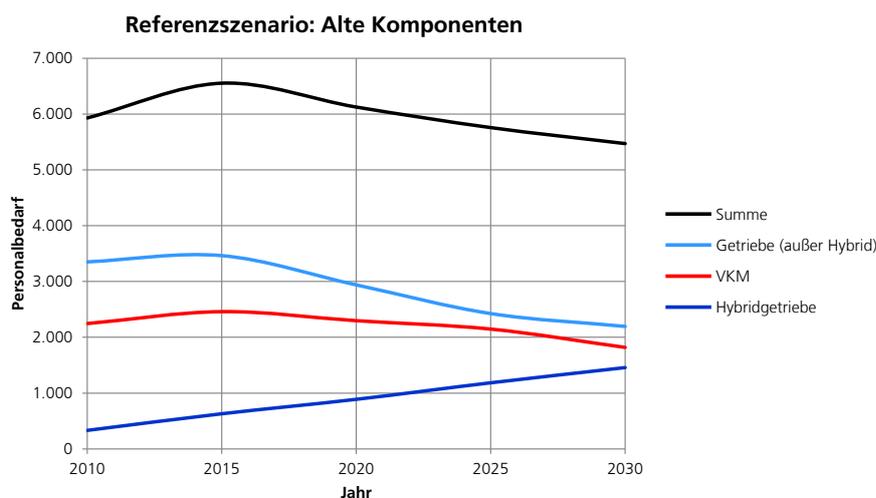


Abbildung 95: Personalbedarf beim Annahmenkomplex „Alte Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

Zwei Phasen sind erkennbar:

- Im Zeitraum von 2010 bis 2015 erfährt der Gesamtpersonalbedarf durch den Anstieg bei den Hybridgetrieben eine Steigerung, da die Bedarfe für Verbrennungskraftmaschine und Getriebe (außer Hybrid) sich kaum verändern.
- Ab 2015 sinken die Personalbedarfe für Getriebe (außer Hybrid) und Verbrennungskraftmaschine. Zwar steigt der Bedarf beim Hybridgetriebe weiterhin an. Ab diesem Zeitpunkt können die Verluste der beiden anderen Komponenten jedoch nicht mehr aufgewogen werden. Im Jahr 2021 ist das Ausgangsniveau des Gesamtpersonalbedarfs erreicht. Erst danach sinken die Werte unter jene der Ausgangssituation.

Insgesamt bewegt sich der Mitarbeiterbedarf zwischen 5.400 und 6.500.

6.6.1.3 Annahmenkomplex „Stop-Loss“

Im Annahmenkomplex „Stop-Loss“ wird das Ziel verfolgt, den Personalbedarf einer Antriebsstrangproduktion für die alten Komponenten im Jahr 2010 durch das Hinzufügen der Herstellung neuer Komponenten über den betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2030 zu erhalten. Dies kann über mehrere Wege erfolgen. Hier wurde, wie in Abbildung 96 dargestellt, die Komponente Leistungselektronik in die Antriebsstrangproduktion integriert.

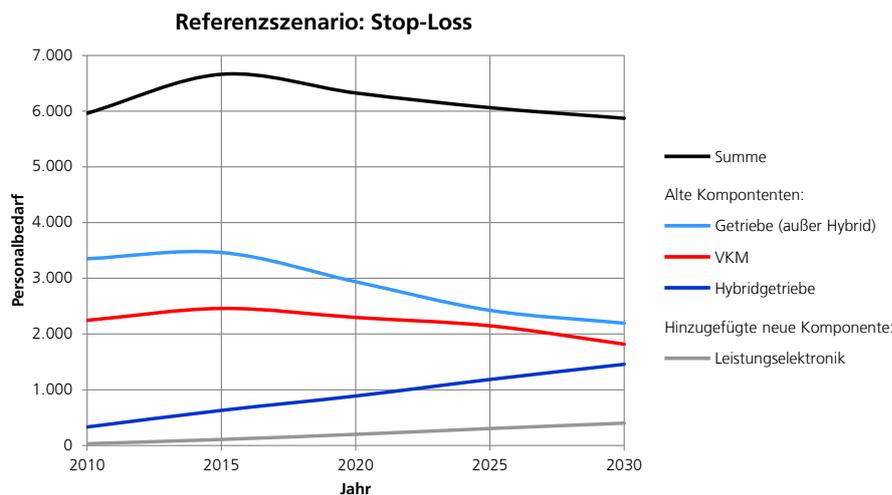


Abbildung 96: Personalbedarf im Annahmenkomplex „Stop-Loss“ (Grafik: Fraunhofer IAO)

Offensichtlich ist der Verlauf ähnlich dem des Annahmenkomplexes „Alte Komponenten“, mit dem Unterschied, dass neue Komponenten die Bedarfsreduktionen aufwiegen.

6.6.2 Extremfälle

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen den Personalbedarf für den Extremfall, dass die Antriebsstrangproduktion in allen Jahren von 2010 bis 2030 nur die Komponenten für ein einziges Antriebsstrangkonzzept herstellt. Dabei werden sämtliche im Rahmen des ELAB-Projekts definierten Antriebsstrangkonzepete (ICE, Mild, HEV, REX, BEV, FCV) betrachtet und analysiert.

6.6.2.1 ICE-Extrem

In diesem Extremfall, dessen Daten Abbildung 97 zeigt, resultiert mit ca. 5.600 Mitarbeitern insgesamt ein geringerer Personalbedarf als beim Referenzszenario in den Jahren 2010, 2015, 2020, 2025 und 2030 (ca. 6.000, 7.000, 6.900, 7.000 und 7.200 Mitarbeiter). Der Grund hierfür ist, dass in der Antriebsstrangproduktion nur noch die Herstellung der zwei benötigten Komponenten VKM und Getriebe (außer Hybrid) abgebildet wird. Für andere Antriebsstrangkonzeppte erforderliche Komponenten bleiben außen vor.

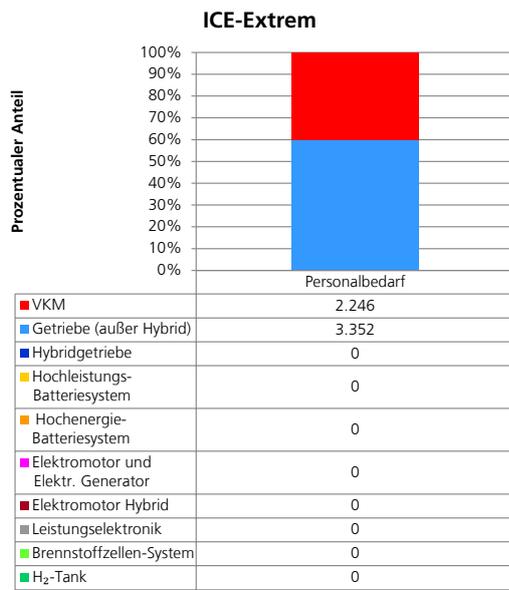


Abbildung 97: Personalbedarf bei der ausschließlichen ICE-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die Komponente Getriebe (außer Hybrid) erfordert in diesem Extremfall einen höheren Arbeitsaufwand, was darauf zurückzuführen ist, dass der wertmäßige Eigenfertigungsanteil der Komponente Getriebe (außer Hybrid) mehr als doppelt so hoch angesetzt ist wie der der Komponente VKM (45% vs. 20%).

Bei Annahme gleicher wertmäßiger Eigenfertigungsanteile besäße die Komponente VKM einen höheren Personalbedarf als die Komponente Getriebe (außer Hybrid). Die angesetzten wertmäßigen Eigenfertigungsanteile überkompensieren jedoch den grundsätzlich höheren Personalbedarf der Komponente VKM (bei gleichen Eigenfertigungsanteilen).

6.6.2.2 Mild-Extrem

Bei reiner Produktion des Mildhybrid-Antriebsstrangs werden die Komponenten VKM, Hybridgetriebe, Hochleistungs-Batteriesystem, Elektromotor Hybrid und Leistungselektronik benötigt. Am Gesamtpersonalbedarf hat die Komponente Hybridgetriebe einen Anteil von ca. 46%, was Abbildung 98 zu entnehmen ist. Für den Antriebsstrang des Mildhybridfahrzeugs wurde ein komplexes 8-Gang-Getriebe angenommen, was dessen hohen Personalbedarf begründet. Unter weiterer Berücksichtigung der Komponente VKM zeigt dies, dass der Personalbedarf für die neuen Komponenten im Vergleich zu den konventionellen Komponenten VKM und Hybrid-

Getriebe beim Antriebsstrangkonzzept Mild eine niedrige Stellung einnimmt (ca. 76% vs. 24%).

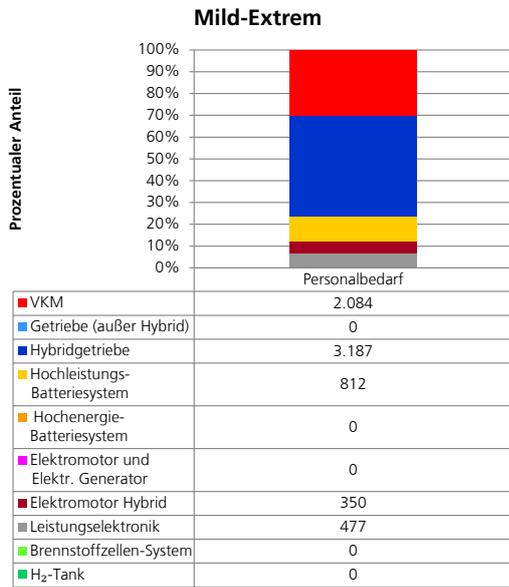


Abbildung 98: Personalbedarf bei der ausschließlichen Mild-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Insgesamt ergibt sich bei diesem Extremfall mit ca. 6.900 Mitarbeitern ein zum durchschnittlichen Personalbedarf im Referenzszenario vergleichbarer Wert.

6.6.2.3 HEV-Extrem

Das Antriebsstrangkonzzept HEV weist zum Teil identische Werte zum Konzept Mild-hybrid auf (Hybridgetriebe, Hochleistungs-Batteriesystem und Elektromotor Hybrid). Unterschiede zeigen sich bei den Komponenten VKM (geringerer Aufwand: niedrigere Zylinderzahl) und Leistungselektronik (leicht höherer Aufwand: höhere Anforderungen), woraus mit ca. 6.800 Mitarbeitern gegenüber dem Extremfall der ausschließlichen Mild-Fertigung ein etwas geringerer Personalbedarf resultiert. Dies veranschaulicht Abbildung 99.

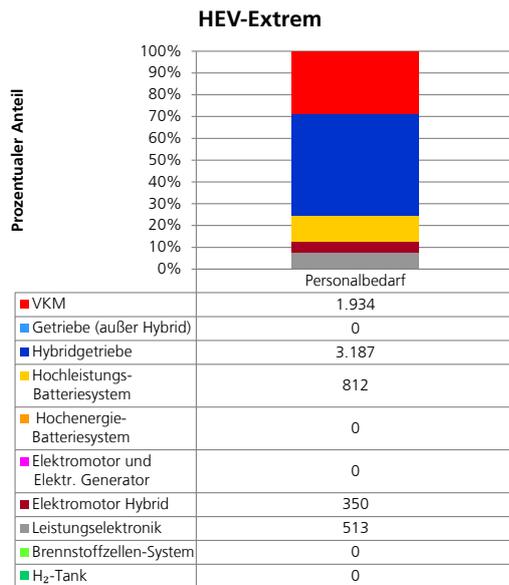


Abbildung 99: Personalbedarf bei der ausschließlichen HEV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

6.6.2.4 REX-Extrem

Beim diesem Extremfall sind drei arbeitsintensive Komponenten erforderlich: VKM, Getriebe (außer Hybrid) sowie der Elektromotor und der elektrische Generator. Im Vergleich zu anderen Konzepten hat die Komponente VKM des Range Extenders nur zwei Zylinder und weist daher eine geringere Komplexität auf.

Anders als die bereits beschriebenen Hybrid-Konzepte erfordert das Antriebssystem des REX zwei elektrische Maschinen (Traktions- sowie Generatorfunktion). Diese haben am Gesamtpersonalbedarf gemäß Abbildung 100 einen nahezu genauso hohen Anteil, wie die Komponente VKM oder Getriebe (außer Hybrid).

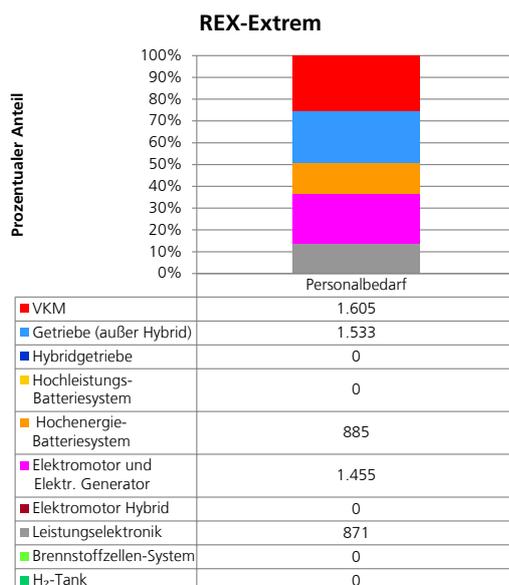


Abbildung 100: Personalbedarf bei der ausschließlichen REX-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Mit ca. 6.300 Mitarbeitern insgesamt ergibt sich für das REX-Konzept ein niedrigerer Wert gegenüber dem durchschnittlichen Personalbedarf beim Referenzszenario.

6.6.2.5 BEV-Extrem

Bei Betrachtung der ausschließlichen Produktion des Antriebsstrangkonzepths BEV kommt zum Vorschein, dass vier Komponenten benötigt werden. Hiervon hat wiederum die Komponente Getriebe (außer Hybrid) den größten Anteil am Personalbedarf. Dies zeigt Abbildung 101.

Trotz hoher Werte für die wertmäßigen Eigenfertigungsanteile von Elektromotor und elektrischer Generator sowie Leistungselektronik machen diese Komponenten deutlich weniger als 50% des Gesamtpersonalbedarfs im hier angenommenen Extremfall aus.

Die Komponente Hochenergie-Batteriesystem hat obgleich ihres geringen wertmäßigen Eigenfertigungsanteils sogar einen höheren Personalbedarf als die Komponenten Elektromotor und elektrischer Generator.

Trotz der drastischen Komplexitätsreduktion der Komponente Getriebe (außer Hybrid) beim Antriebsstrangkonzepth BEV benötigt deren Produktion immer noch mehr Personal als die abgebildeten Produktionsschritte der sonstigen in diesem Extremfall betrachteten Komponenten.

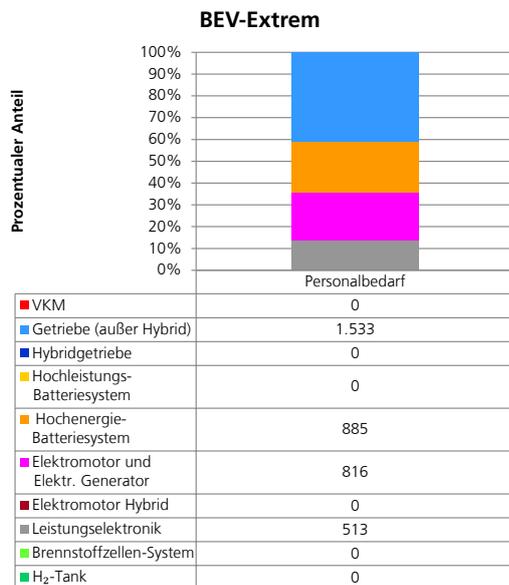


Abbildung 101: Personalbedarf bei der ausschließlichen BEV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Im Vergleich zum Durchschnitt beim Referenzszenario ist der Personalbedarf hier mit ca. 3.700 sehr gering.

6.6.2.6 FCV-Extrem

Werden nur FCV-Antriebsstränge produziert, gestaltet sich die Herstellung sehr personalintensiv. Der Grund dafür liegt im Aufbau dieses Antriebsstrangkongzeptes, das zum Beispiel mit dem Brennstoffzellen-System und dem H₂-Tank mehr Komponenten als das BEV-Konzept benötigt. Außerdem sind die Komponenten des FCV merklich komplexer. So werden etwa in der Leistungselektronik zusätzliche Module verbaut (z.B. DC/DC-Hochvolt-Wandler).

Wie Abbildung 102 zu entnehmen ist, entfällt rund ein Drittel des erforderlichen Gesamtpersonalbedarfs auf die Komponente Brennstoffzellen-System. Dies wird bei Berücksichtigung ihres hohen wertmäßigen Eigenfertigungsanteils von 50% und den zahlreichen für die Fertigung notwendigen (manuellen) Arbeitsschritten nachvollziehbar. Im Vergleich zu anderen Extremfällen entsteht hier ein sehr hoher Personalbedarf (über 7.400).

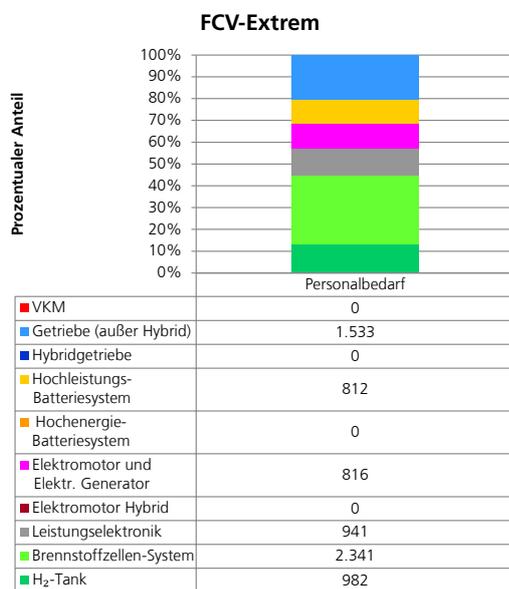


Abbildung 102: Personalbedarf bei der ausschließlichen FCV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)

7 Kompetenzanforderungen und Qualifikationen

Autor: Jürgen Dispan (IMU Institut)

7.1 Vorgehensweise

Die auf Kompetenzanforderungen und Qualifikationserfordernisse von Beschäftigten in der Antriebsstrangproduktion bezogene, qualitative Wirkungsanalyse steht im Zentrum des folgenden Kapitels. Forschungsleitende Fragestellungen des entsprechenden ELAB-Arbeitspaketes waren:

- Wie verändern sich Kompetenzanforderungen im Technologiewandel?
- Welche Qualifikationen von Beschäftigten sind für die Produktion von neuen Antriebssträngen erforderlich?
- Wie können Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel durch eine Verbesserung von Standortfaktoren unterstützen?
- Welchen Einfluss haben Arbeitsmarkt und demographischer Wandel?

Für die Bearbeitung dieser Fragestellungen wurden verschiedene qualitative Methoden der sozialwissenschaftlichen Forschung angewendet. Die entsprechende qualitative Wirkungsanalyse basiert im Wesentlichen auf einem Methodenmix aus folgenden drei Bausteinen:

- (1) auf der Analyse von Komponenten und Prozessen in den vorangegangenen ELAB-Arbeitspaketen, aus denen Kompetenzanforderungen und Qualifizierungsbedarfe abgeleitet werden,
- (2) auf eigens durchgeführten, leitfadengestützten Expertengesprächen¹ zur weiteren Informationsgewinnung, Vertiefung und Validierung. Expertengespräche wurden geführt mit Akteuren aus Unternehmen (OEM und Zulieferer aus den Bereichen Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik, Brennstoffzellensystem), aus Forschungsinstituten und aus weiteren Institutionen, die im Themenfeld „Elektromobilität und Bildung“ aktiv sind. Insgesamt wurden 25 Experten ausführlich „face-to-face“ befragt. Flankierend wurden Telefoninterviews mit 10 Experten durchgeführt,
- (3) auf der Sekundäranalyse von Literatur und weiteren Dokumenten, wie z. B. Tagungsbeiträgen, Unternehmensinformationen aus dem Internet, etc. (siehe Literaturverzeichnis).

¹ Ergebnisse und Zitate aus Expertengesprächen, auf die explizit referenziert wird, sind im Text durch den Zusatz „Exp.“ kenntlich gemacht.

7.2 Kompetenzanforderungen im Wandel

Bevor auf die empirischen Ergebnisse der ELAB-Analyse, also die speziell aus der Elektrifizierung des Antriebsstrangs resultierenden Kompetenzanforderungen, eingegangen wird, sollen einleitend die Entwicklungstrends der Industriearbeit und der damit einhergehende Wandel bei Qualifikationsanforderungen allgemeiner betrachtet werden.

7.2.1 Vorbemerkung: Entwicklungstrends der Industriearbeit

Dem Produzierenden Gewerbe und damit insbesondere Industrie und Handwerk kommt in Deutschland eine Schlüsselstellung zu. Einen wichtigen Beitrag für den wirtschaftlichen Erfolg leistet zum einen die Entwicklung neuer Produkte. „Aber erst die Herstellung und der erfolgreiche Absatz dieser Produkte sind entscheidend für Wertschöpfung und damit für den Wohlstand der Gesellschaft“ (Abele & Reinhart, 2011, S. 6). Das Produzierende Gewerbe stellt eine Vielzahl von Arbeitsplätzen. 7,7 Mio. Beschäftigte sind direkt in diesem Sektor tätig. Dazu kommt die Schrittmacherfunktion der produzierenden Unternehmen als wichtige Nachfrager und Impulsgeber für produktionsnahe Dienstleistungen, wie z. B. Engineering, Datenverarbeitung, Logistik, Beratung. Mithin kommen nochmals mehr als 7 Mio. Arbeitsplätze im Dienstleistungssektor hinzu, die eng mit dem Produzierenden Gewerbe verknüpft sind. Gut 95 % der Exporte und rund 90 % der FuE-Aufwendungen der deutschen Wirtschaft entfallen auf das Verarbeitende Gewerbe. Trotz des vielfach propagierten Wandels von der Industrie- zur Dienstleistungsgesellschaft zeigen die Fakten: „Die Produktion ist das Rückgrat des deutschen Wohlstands“ (Abele & Reinhart, 2011, S. 7). Und gerade auch in der zurückliegenden Wirtschaftskrise hat sich die deutsche Wirtschaftsstruktur bewährt (Allespach & Ziegler, 2012). Vor diesem Hintergrund einer herausragenden Bedeutung der Industrie untersuchte das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), welche aktuellen und zukünftigen Veränderungen der Arbeit in der Industrie Handlungsbedarfe für die Bildungs-, Wirtschafts- und Innovationspolitik nach sich ziehen könnten. Der entsprechende TAB-Zukunftsreport betrachtet die ELAB-Thematik nicht explizit, sondern geht übergreifend auf Entwicklungen wie Internationalisierung, innere Tertiarisierung, veränderte Formen der Arbeitsorganisation ein, die das Handeln und die Wertschöpfung der Industriebetriebe in Zukunft verstärkt beeinflussen werden.

Die aus der TAB-Studie „Arbeiten in der Zukunft – Strukturen und Trends in der Industriearbeit“ abgeleiteten, auch für ELAB relevanten Entwicklungstrends der Industriearbeit und daraus resultierende neue Kompetenzanforderungen, werden im Folgenden stichwortartig zusammengefasst (Kinkel, Friedewald, Hüsing, Lay, & Lindner, 2008):

- Die fortschreitende Internationalisierung führt im Inland zu Bedeutungsgewinnen der koordinierenden Tätigkeiten sowie der dienstleistenden und beratenden Tätigkeiten für Auslandswerke bzw. den internationalen Werksverbund, verbunden mit einer höheren Gewichtung von interkulturellen Kompetenzen und internationaler Kommunikationsfähigkeit. Auf Ebene der Produktionsbeschäftigten wird eine zunehmende Erweiterung der Tätigkeiten um qualitätssichernde und kontrollierende Aufgaben erwartet. Gleichzeitig werden einfache Tätigkeiten für Geringqualifizierte zukünftig noch stärker als bislang entweder verlagert oder hochautomatisiert und damit weniger personalintensiv weiterhin in Deutschland durchgeführt.
- Die Tendenz zu mehr Dienstleistungstätigkeiten in produzierenden Industrieunternehmen („innere Tertiarisierung der Industriearbeit“) wird zukünftig wohl wei-

ter fortschreiten. Insbesondere ein Ausbau produktbegleitender Dienstleistungen (Service, Schulungen, etc.) wird erwartet, verbunden mit einem erhöhten Bedarf an Beschäftigte mit Hochschul- oder Technikerabschluss, während an- und ungelernetes Personal seltener benötigt wird. Gleichzeitig könnte die innere Tertiarisierung dazu führen, dass die in vielen Betrieben existente Integration von produzierenden und dienstleistenden Tätigkeiten bei einzelnen Beschäftigten wieder zurückgeführt wird und eine „Desintegration von Produktions- und Dienstleistungstätigkeiten“ bei der Fachkraft Raum greift.

- Eine der wichtigsten Bedingungen für eine zukünftig wettbewerbsfähige Produktion ist es, den Beschäftigten den Erwerb neuer Kompetenzen während der Arbeitszeit zu ermöglichen und sie flexibel einsetzen zu können.
- Neue Formen der Arbeitsorganisation werden im Rahmen Ganzheitlicher Produktionssysteme erforderlich. Industriearbeit in selbstverantwortlichen Gruppen könnte laut TAB-Zukunftsreport eine neue Dynamik bekommen. In welche Richtung sich die Konzepte Ganzheitlicher Produktionssysteme weiterentwickeln sollte genau beobachtet werden, um zukünftige neue Kompetenzanforderungen und Qualifikationsbedarfe rechtzeitig aufgreifen zu können.

Als Fazit der TAB-Studie „Arbeiten in der Zukunft“ wird auf ein „besorgniserregendes doppeltes Dilemma“ hingewiesen:

„Auf der einen Seite werden einfache und wenig know-how-intensive Tätigkeiten, die von geringqualifizierten Beschäftigten ausgeführt werden können, zukünftig noch deutlich weniger als bereits bislang von der produzierenden Industrie nachgefragt werden. Auf der anderen Seite ist absehbar, dass der steigende Bedarf an Hochschulabsolventen zunehmend schwieriger gedeckt werden kann“ (Kinkel, Friedewald, Hüsing, Lay, & Lindner, 2008, S. 24).

Insgesamt ist zu konstatieren, dass das Monitoring von technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen wie auch der politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen von essentieller Bedeutung für Unternehmen ist. Im Rahmen des Technologie- und Strukturwandels wird das Antizipieren von Veränderungen auf betrieblicher Ebene durch die betrieblichen Akteure vom Personalbereich bis zur Interessenvertretung immer wichtiger, wie nicht zuletzt das europäische Projekt „Anticipation of Change in the Automotive Industry“ zeigt (Jürgens, Loire, McKiernan, & et al., 2009). Ziel dieses Projekts war die Identifizierung von Antizipationsmechanismen in Unternehmen und Regionen zur frühzeitigen Erkennung eines technologischen und/oder gesellschaftlichen Strukturwandels. Dazu wird konstatiert, dass vor allem die Themen Ausbildung und Weiterbildung zu kurz kommen – „sie werden oft nur über einen Zeitraum von zwei Jahren beobachtet. Nur in Einzelfällen wird der künftige Bedarf an Kompetenzen und Qualifikationen über Kompetenz-Managementsysteme bewertet und entsprechend geplant. Nicht beantwortet wird dabei, wie in zehn Jahren Tätigkeitsprofile aussehen könnten, welche Auswirkungen innovative Entwicklungen haben und welche Anforderungen für die Weiterbildung daraus entstehen“ (Meißner, 2010, S. 3).

Identifizierte Qualifikationslücken gilt es vor allem durch die Integration von Qualifikationen in bestehende Berufsbilder und durch entsprechende Weiterbildungsmaßnahmen zu schließen. Was in einer Studie zu „zukunftsfähigen Technologie- und Innovationsstrategien in hoch spezialisierten Industrieregionen“, beauftragt von Hans-Böckler-Stiftung und IG Metall, geschrieben steht, gilt auch hier:

„Nicht rechtzeitig oder nicht in der richtigen Qualität zur Verfügung stehende Kompetenzen (des Personals) verhindern gegebenenfalls das Ausschöpfen sämtlicher mit der Einführung neuer Technologien und Verfahren beabsichtigter Potenziale. Eine ‚Synchronisation‘ der Personalentwicklungsaktivitäten mit denen der Technologie-

Planung ist daher angezeigt“ (Kleine, Kinkel, Som, Bräunlich, & Kräusel, 2010, S. 85). Für die längerfristige Betrachtung von Kompetenzanforderungen, künftigen Qualifikationsbedarfen und Maßnahmen der Aus- und Weiterbildung im Sinne der angesprochenen „Synchronisation“ soll die vorliegende Studie Hinweise liefern.

7.2.2 Veränderungen durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Nach dem allgemeinen Einstieg sei der Blick nunmehr auf das Themenfeld Elektromobilität gerichtet: Im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs verändern sich auch die Kompetenzanforderungen an die Beschäftigten entlang der elektromobilen Prozesskette von Forschung und Entwicklung (FuE) über Produktion und Service bis zum Recycling. Im Fokus der ELAB-Betrachtung liegen die neuen Kompetenzanforderungen für die Produktion von Komponenten für den alternativen Antriebsstrang, also in erster Linie von Batterien, Elektromotoren und Leistungselektronik sowie Brennstoffzellensystemen. Aber auch die Produktion konventioneller Antriebsstränge ist mit erweiterten Kompetenzanforderungen konfrontiert. Aus der weiteren Optimierung der konventionellen Komponenten Verbrennungsmotor und Getriebe resultieren Produktionsprozesse mit hohen Genauigkeits- und Reinraumanforderungen, die eine entsprechende Sorgfalt der Mitarbeiter/innen und Qualifikationen rund um Reinraumtechnologien erfordern. Gleichzeitig werden neue Werkstoffe und Leichtbauweise für den gesamten Automotive-Bereich, also über den reinen Antriebsstrang hinaus, als Themen immer wichtiger, woraus sich ebenfalls neue Kompetenzanforderungen für Facharbeiter und Entwickler ableiten (Dispan & Meißner, 2011).

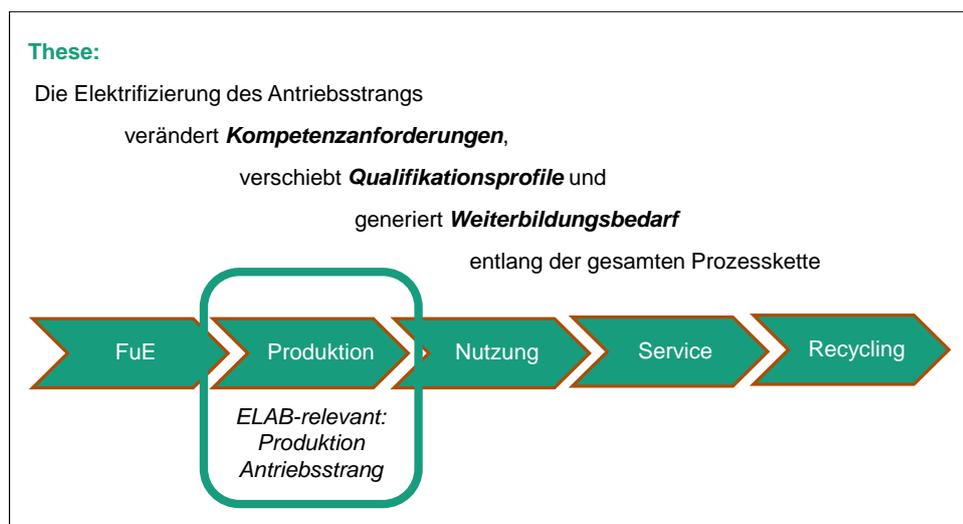


Abbildung 103: Prozesskette „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“

7.2.3 Bedeutungszunahme Elektronik

Infolge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Automobilen werden sich die Wertschöpfungsanteile im Antriebsstrang deutlich von Metall/Mechanik (M/M) hin zu Elektrik/Elektronik (E/E) verschieben. Bosch geht z. B. davon aus, dass sich der E/E-Anteil an der Wertschöpfung im Kraftfahrzeug von 40 % beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor auf 75 % beim Elektroauto erhöht (Bohr, 2011). Allein die Lithium-Ionen-Batterie als Energiespeicher hat – so eine Modellrechnung des Zulieferers ZF – im Jahr 2020 einen Wertanteil von knapp 40 % am Elektroauto-Endpreis. Dazu kommen der Elektromotor und die Leistungselektronik mit 10 % Wertanteil

(Naunheimer, 2011). Darüber hinaus werden die elektronischen Systeme umfassender und aufwändiger über Software gesteuert. Bereits diese massiven Verschiebungen der Wertschöpfung zeigen, dass hinter der Elektrifizierung des Antriebsstrangs nicht nur eine neue Motorisierungsvariante steckt, sondern ein grundlegender Systemwechsel in der Automobilindustrie. Der Elektroantrieb könnte sich als disruptive Technologie erweisen (Deutsches Dialog Institut, 2011). Die „neue Welt der e-Mobilität (gehört zu den) das laufende Geschäft kannibalisierenden, disruptiven Innovationen, die längerfristig zweifellos die größeren Chancen bieten, die wir aber auch ganz anders ‚managen‘ müssen“ (Christensen, Matzler, & von den Eichen, 2011, S. VI). Bei den Automobilherstellern herrscht weitgehend Einigkeit, dass Hybrid- und Elektroantriebe mittel- bis langfristig den klassischen Verbrenner ablösen werden. Dazu einige Statements aus den Reihen deutscher Automobilhersteller und -zulieferer (Dispan, Krumm, & Seibold, 2009, S. 209):

- „Das Auto der Zukunft fährt elektrisch.“
- „Wir haben das Automobil erfunden, jetzt erfinden wir es neu!“
- „Die Zukunft, das ist sicher, wird den emissionsfreien Elektroantrieben gehören.“
- „Der Trend zur Elektromobilität ist unumkehrbar.“
- ...

Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass es nicht zu einem „Umbruch über Nacht“ kommt, sondern dass im Automobil Verbrennungsmotoren noch längere Zeit dominant bleiben und dass die Zukunft der Individualmobilität auf viele Jahre hinaus von einem Nebeneinander verschiedener Antriebstechnologien und Energieträger geprägt sein wird.

Gleichwohl sind Beschäftigte bei Autoherstellern und bei Zulieferern aufgrund des bevorstehenden Technologie- und Strukturwandels „nicht ohne Grund verunsichert. Steckt doch sehr viel Know-how bei der Automobilherstellung in der Metallbe- und -verarbeitung. Allein schon die maschinelle Herstellung von Motoren, Getrieben und deren Teilen würde einem starken Wandel unterliegen“ (IG Metall, 2010, S. 2). Der gleichzeitig steigende Anteil der Wertschöpfung im Bereich Elektrik und Elektronik sollte laut IG Metall als Aufruf für langfristige Bildungsstrategien gerade für die Beschäftigten in den mechanischen Fertigungsbereichen und der Montage verstanden werden. „Hier wird in Zukunft eine berufliche Handlungsfähigkeit in Qualifikationen wie Hochvolttechnik, Mechatronik und IT immer mehr eine Rolle spielen“ (IG Metall, 2010, S. 2).

Eine wesentliche Herausforderung der Elektromobilität ist – so die Studie „Boost“ von McKinsey – der Aufbau von Fähigkeiten bei den Beschäftigten. Mit dem Trend zur Elektromobilität verschiebe sich das Kompetenzprofil im Bereich Automotive-Powertrain von der Mechanik hin zur „Me-chem-tronik“: 2030 werde der Anteil der Beschäftigten in den klassischen mechanischen Technologien weltweit von 80 % auf 60 % gesunken sein. Die restlichen 40 % entfallen dann auf Elektroniker und Chemiker: „A shift of skills and competences from mechanics to ‚me-chem-tronics‘ will occur. More electronics and chemicals competences will be required“ (Malorny & Linder, 2012, S. 43). Damit entfallen mehr als 90 % der neugeschaffenen Powertrain-Arbeitsplätze auf die Bereiche Mikroelektronik, Elektrotechnik, Software/IT, Chemie und Kunststofftechnik. Speziell bei Produktionsbeschäftigten werde es – bezogen auf Europa – bei klassischen „Metall-Kompetenzen“ wie Gießen, Schmieden, Zerspanen bis 2030 nach der Boost-Prognose einen Arbeitsplatzabbau um 22.000 Stellen geben. Einen klaren Beschäftigungszuwachs in der Produktion gebe es dagegen bei Kompetenzen wie Mikrosystemtechnik (+38.000), Kunststoffbearbeitung (+32.000), Chemie (+18.000), Montage (+13.000) und Verbindungstechnik (+11.000).

7.2.4 Gewichtsverlagerung hin zu Montagearbeit

Schon die deutlich geringere Anzahl der Bauteile im elektrischen Antriebsstrang ist ein Indiz für die starken Veränderungen. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor kann die Komplexität des Antriebsstrangs beim Elektroauto signifikant reduziert werden, allein die Bauteilanzahl ist bei Elektromotoren mit ca. 100 bis 200 Bauteilen wesentlich geringer als bei Verbrennungsmotoren mit ca. 1.400 Bauteilen. Insgesamt wird Elektromobilität – so Ergebnisse des FAPS (Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik) an der Universität Erlangen-Nürnberg – „die bekannten Produktionsprozesse der automobilen Antriebstechnik dramatisch verändern“ (Franke, 2011):

- Zum einen werden Montageprozesse gegenüber formgebenden Fertigungsverfahren wie Fräsen, Drehen, Schleifen an Bedeutung gewinnen. Es wird davon ausgegangen, dass der „Schwerpunkt spanende Fertigungsverfahren“ beim Verbrennungsmotor durch den „Schwerpunkt Montageprozesse“ beim Elektroantrieb abgelöst wird. Beim Elektroantrieb gibt es im Vergleich zum Verbrennungsmotor eine „extreme Verschiebung der Produktionsanteile“ (Pfeiffer P., 2011). Zerspanungsprozesse werden beim Elektromotor lediglich im Bereich Gehäuse, Welle, Lager benötigt. Zerspanende Fertigung wird fast gänzlich von komplexen Montageprozessen verdrängt.
- Zum anderen müssen die verfügbaren Prozesse des Elektromotorenbaus an die hohen Anforderungen der Automobilindustrie angepasst werden. Und die Kostenziele können nur durch eine hochqualitative und produktive Automatisierung der Fertigungsprozesse erreicht werden.

Auch für vorgelagerte Fertigungsverfahren wird ein starker Wandel prognostiziert. Insbesondere für die Gießertechnologie bedeutet der Wechsel der Antriebstechnik notwendigerweise auch einen Wandel im Produktportfolio und Produktionsvolumen. „Langfristig ist ein Wegfall klassischer gießtechnisch hergestellter Baugruppen im Automobil wie Zylinderkopf, Schaltgetriebegehäuse, Krümmer, Einspritzpumpe usw. hinsichtlich der Variantenvielfalt und der absetzbaren Stückzahl zu erwarten“ (Wöstmann, 2011, S. 456).

Auswirkungen des Wandels zum Hybridantrieb und zum Elektroantrieb zeigen sich deutlich an den unterschiedlichen Zerspanungshauptzeiten, die vom PTW (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen) an der TU Darmstadt untersucht wurden. „Es ist festzustellen, dass die Anzahl der Bauteile, die durch zerspanende Verfahren wie Dreh-, Fräs-, Bohr- oder Schleifprozesse bearbeitet werden, in Abhängigkeit der Konzeptlösungen deutlich variieren“ (Abele, Hohenstein, Pfeiffer, & von Wihl, 2009, S. 15):

- Beim Hybridkonzept (Voll-Hybrid) kommen im Vergleich zur reinen Verbrennungskraftmaschine (VKM) allein aufgrund des zweiten Motors einige Komponenten hinzu, wodurch sich der Zerspanungsanteil um ca. 10 % erhöht.
- Beim reinen Elektroantrieb dagegen verringern sich die zerspanenden Fertigungsverfahren drastisch um 72 %, besonders stark gehen die Verfahren Fräsen, Bohren und Schleifen zurück.
- Beim Brennstoffzellenfahrzeug sind die Auswirkungen auf die Zerspanungszeiten mit einem Rückgang um fast 60 % ähnlich gravierend.

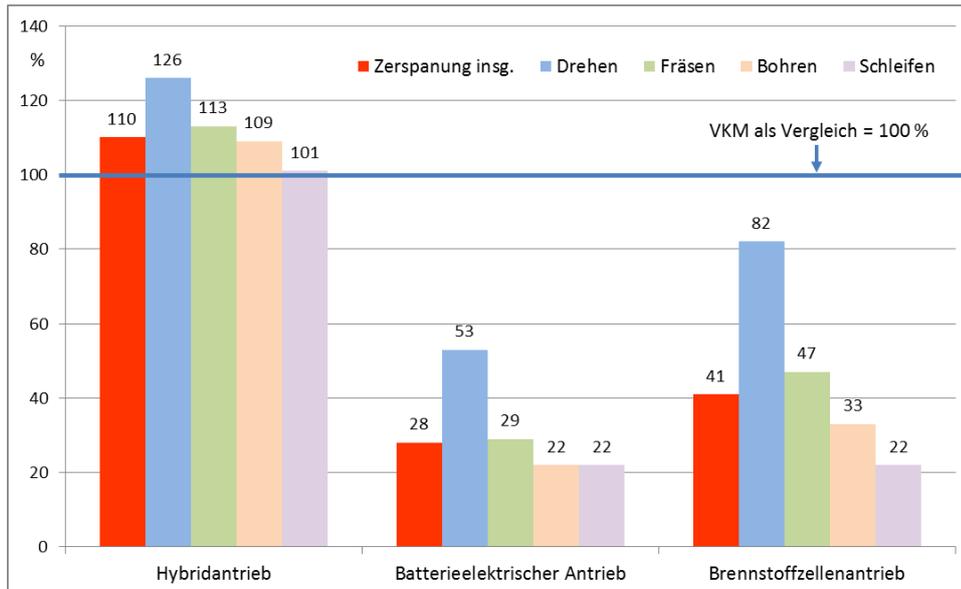


Abbildung 104: Auswirkungen des Wandels zum Elektroantrieb auf die Zerspanungszeiten der Antriebsstrang-Komponenten¹

Insgesamt „bleibt festzuhalten, dass der Pkw-Antriebsstrang bei elektrischen Antriebskonzepten wesentlich weniger mechanisch beanspruchte Komponenten und weniger rotatorische Bauteile aufweist“ (Abele, Hohenstein, Pfeiffer, & von Wihl, 2009, S. 16). Aufgrund der Rückgänge in der Zerspanung und unter Berücksichtigung jährlicher Produktivitätszuwächse wird „für den europäischen Markt eine Reduktion des Kapazitätsbedarfs im Antriebsstrang von ungefähr 37 % prognostiziert“ (Abele, Rumpel, Hohenstein, & Benning, 2009, S. 996). Die Forscher am PTW kommen zum Fazit, dass Komponentenfertiger für den automobilen Antriebsstrang gezwungen sein werden, die neu entstehenden Zerspanungsaufgaben im Bereich der elektrischen Antriebskomponenten der Hybrid- und Elektroautos zu erschließen, um hier Marktanteile zu gewinnen und damit Beschäftigung in den bestehenden Komponentenwerken zu sichern.

Nicht nur diese Untersuchungen des PTW zeigen klar, dass die spanende Metallverarbeitung (Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen) langfristig beim Übergang zur Elektromobilität an Bedeutung verliert. Auch der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) kommt in einer gemeinsam mit Roland Berger Strategy Consultants durchgeführten Studie zu einem ähnlichen Resümee: „Während in der Automobilindustrie besonders bei der Antriebsstrang-Produktion vor allem Metallverarbeitung relevant war (umformend oder spanend), werden in Zukunft vor allem bei der Batterieproduktion andere Technologien eingesetzt werden (z. B. Mischen, Beschichten)“ (Schlick, Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael, 2011, S. 14). Damit verändern sich die Anforderungen ans Technologieportfolio der Ausrüster aus dem Maschinen- und Anlagenbau, wie in der entsprechenden VDMA-Studie „Zukunftsfeld Elektromobilität“ untersucht (Schlick, Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael, 2011): Beschich-

¹ Auswirkungen des Wandels zum Elektroantrieb auf die Zerspanungszeiten der Antriebsstrang-Komponenten (in Prozent gegenüber Verbrennungskraftmaschine) (Abele, Hohenstein, Pfeiffer, & von Wihl, 2009, S. 16)

tungs- und Automatisierungstechnik werden für die Produktion von Batterien, Elektromotoren, aber auch von Brennstoffzellen essentiell. Trotz voraussichtlich hoher Automatisierung ändern sich dadurch tendenziell aber auch die Kompetenzanforderungen an die Beschäftigten in der Komponentenproduktion.

Eine Schwerpunktverlagerung hin zu Montageprozessen (Franke, 2011) könnte auf den ersten Blick mit einem „Dequalifizierungstrend“ oder mit „Verlagerungsgefahr“ in Verbindung gebracht werden. Montagearbeit an sich gilt traditionell als „einfache“ Arbeit, die zum überwiegenden Teil von Angelernten ausgeübt wird. Trotz des allenthalben feststellbaren Trends zur Wissensgesellschaft bleibt industrielle Montagearbeit ein relevanter Beschäftigungsbereich, der sich aber aufgrund verschiedener Faktoren in den letzten Jahren stark wandelt: Internationalisierung des Wettbewerbs, steigende Variantenvielfalt, sinkende Produktwechselzyklen und schwankende Mengenbedarfe führen zu einer „ansteigenden Komplexität auf der Ebene der Produkte, Prozesse und Produktionssysteme, deren Beherrschung ein strategischer Erfolgsfaktor ist“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009, S. 246). Daraus resultiert die Anforderung an eine hohe Flexibilität, die sowohl an die eingesetzten Montagetechnologien als auch an die Montagearbeiter gestellt wird. Ein durch Technisierung und durch neue Formen der Arbeitsorganisation hervorgerufener „Qualifikationsshift“ auch für Angelernte ist zu beobachten; Fach- und Prozesskompetenzen werden immer wichtiger. Alles in allem ist gerade bei einfacher Arbeit zwischen der formalen Qualifikation und dem tatsächlichen Qualifikationsprofil bzw. Tätigkeitsinhalt der konkreten Stelle zu unterscheiden. Viele Arbeitskräfte in der Montage sind zwar formal niedrig qualifiziert, konnten sich aber im Umgang mit komplexen Produkten und in automatisierten Arbeitsumgebungen im Laufe des Berufslebens eine hohe Kompetenz, ein großes Erfahrungswissen aneignen. Nicht zuletzt im Kontext mit Ganzheitlichen Produktionssystemen geht es in der Montage zunehmend um Fähigkeiten, „das Ganze im Blick zu haben (also den Prozess und nicht nur den einzelnen Arbeitsplatz) und flexibel mit Unvorhergesehenem umgehen zu können. ... Montage ist alles andere als ‚nur‘ einfache Arbeit“ (Pfeiffer S. , 2007, S. 213). Hochmoderne und flexible Montagesysteme im Zusammenhang mit einer stärker aufkommen den Wertschätzung von Erfahrungswissen in der Montagearbeit könnten dazu beitragen, dass Montagearbeit nicht zum von Verlagerung bedrohten Auslaufmodell wird und der Standort Deutschland als Montagestandort weiterhin Perspektiven hat (Lang, 2008).

In eine ähnliche Richtung geht das Fazit von Peter Ittermann et al. (2011), in deren Studie zwischen drei Typen von Einfacharbeit unterschieden wird, dem klassisch-tayloristischen Muster, dem flexibel-taylorisierten Muster und dem extrafunktional erweiterten Muster. Insbesondere die beiden letztgenannten Muster kommen bei der hier betrachteten Montagearbeit in der Metall- und Elektroindustrie zum Zuge. Flexibel taylorisierte Einfacharbeit ist im Vergleich zum klassischen Taylorismus durch ein „Job-Enlargement auf niedrigem Niveau“ gekennzeichnet, das Jobrotation und gewisse Handlungsspielräume bei der Planung des Personaleinsatzes beinhaltet. Dazu kommen Qualitätssicherungsaufgaben („Werkerselbstprüfung als produktionsbegleitende QS“) und erhöhte Dokumentationsaufwände aufgrund von Tests und Prüfungen. Beim extrafunktional erweiterten Muster handelt es sich dagegen um eine deutliche Ausweitung des Aufgabenspektrums von Einfacharbeit. Insbesondere durch Ganzheitliche Produktionssysteme werden Beschäftigte in einfachen Tätigkeiten mit neuen Anforderungen konfrontiert, konkret mit einer Zunahme der Aufgaben und Verantwortung bei der Qualitätssicherung, der Produktionsplanung, der Produktionssteuerung und der Logistik (Ittermann, Abel, & Dostal, 2011, S. 170).

Auf die Automobilindustrie bezogen sind im Rahmen Ganzheitlicher Produktionssysteme – so eine Analyse des Instituts für Berufsbildung an der Universität Kassel – verschiedene Tätigkeitsprofile zu beobachten: Zum einen in den direkten Produkti-

onstatigkeiten „eine Art der qualifizierten Routinearbeit, die sich an Standards orientiert, hochrepetitiv und monoton ist, bei der aber gleichzeitig die aktive Beteiligung an der fortschreitenden Optimierung dieser Prozesse eingefordert wird“ (Clement, 2010, S. 41). Damit werden die repetitiven Arbeitsaufgaben mit Komplementär- und Optimierungsaufgaben verbunden. Daneben bestehen in anderen Bereichen wie z. B. der Instandhaltung die traditionellen Facharbeiterprofile fort. In stark automatisierten Produktionsbereichen sind Arbeitende überwiegend mit der Beobachtung und Kontrolle automatisierter Prozesse befasst. „Hier entstehen neue Anforderungen im Bereich des kognitiven, systematisierten Fachwissens, das umfassendere betriebliche und sachliche Zusammenhänge umfasst“ (Clement, 2010, S. 42). Ein Fazit dieser Studie: „Dominante Arbeitstypen wie die qualifizierte Facharbeit oder Angelerntenpositionen am Fließband existieren zwar fort, werden aber zunehmend durch weiter ausdifferenzierte Tätigkeitsprofile verdrängt. Wir finden auf der einen Seite ganzheitlich angelegte, mit hohen Problemloseanforderungen ausgestattete Arbeitsplätze, daneben aber auch niedrig entlohnte Arbeitsplätze ohne hohe Qualifikationsanforderungen und dazwischen eine ganze Reihe von Mischformen wie z. B. die qualifizierte Routinearbeit, die Aufsicht automatisierter Produktionsabläufe, die Koordination von Schnittstellen u.a.m. ... Die Gesamtentwicklung kann allenfalls als ‚polarisierende Heterogenisierung der Belegschaftsstruktur‘ (Baethge) beschrieben werden, bei der qualifizierte Routinearbeit neben problemlosender Facharbeit und neben produktionsnaher Managementtätigkeit steht, ohne dass sich diese in ein einheitliches Profil fügen lassen würden“ (Clement, 2010, S. 42).

Montagearbeit im Rahmen Ganzheitlicher Produktionssysteme wird bei der Produktion konventioneller Komponenten wie auch bei der Produktion von Komponenten für alternative Antriebsstränge weiterhin eine große Rolle spielen. Ein genereller Dequalifizierungstrend ist nicht zu erwarten, jedoch werden im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs in der Komponentenproduktion die Montagetätigkeiten im Vergleich zu klassischen Facharbeitertatigkeiten, wie z. B. in der mechanischen Fertigung, tendenziell zunehmen.

Diese Gewichtsverlagerung hin zu Montagearbeit steht in den den Technologiewandel begleitenden bildungs- und arbeitspolitischen Debatten nicht im Vordergrund. Dominant in der entsprechenden Diskussion ist die Thematik „Umgang mit Hochvolt-Systemen“ (vgl. folgendes Kapitel). So stand bei der Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität im Juni 2011 in Ulm (die im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität stattfand) die Hochvolt-Thematik im Bereich „Berufliche Aus- und Weiterbildung in der Automobilindustrie und Fahrzeugtechnik“ im Zentrum. Und auch von den meisten befragten Experten wird für Produktionsbeschaftigte der Umgang mit Hochvolt-Systemen als zentrale neue Kompetenzanforderung im Zeitalter des Hybrid- und Elektroautos hervorgehoben: „Bei den Produktionstätigkeiten wird es keine Kompetenzsprunge geben. Fertigung und Montage der neuen Komponenten lassen sich in den meisten Bereichen mit bestehenden Qualifikationen abdecken. Nur Hochvolt-Qualifikationen kommen neu hinzu. Anders sieht es bei den Entwicklern aus, bei denen Kenntnisse in elektronischen und chemischen Gebieten immer wichtiger werden“ (Exp.). „Für die Entwicklung neuer Antriebe benötigt man exzellente Leute mit neuen Qualifikationsprofilen, in der Produktion wird sich aber von den Kompetenzanforderungen her nicht so viel ändern“ (Exp.).

7.2.5 Umgang mit Hochvolt-Systemen

Als neue, mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs einhergehende Kompetenzanforderung mit zentraler Bedeutung in der betrieblichen Praxis der Produktion von Hybrid- und Elektroautos gilt der Umgang mit Hochvolt-Systemen. Von Hochvolt-Systemen bzw. von Hochvolt-Fahrzeugen wird bei Spannungen ab 25 Volt Wechsel-

spannung (AC) oder 60 Volt Gleichspannung (DC) gesprochen (DGUV, 2010). Während die Mitarbeiter in der entsprechenden Produktion bei Autos mit Verbrennungsmotoren mit Spannungen bis 48 Volt (DC) zu tun haben, werden sie bei elektrifizierten Antriebskonzepten mit bis zu 1.000 Volt konfrontiert. Die Beschäftigten müssen entsprechend in der Lage sein, anfallende elektrotechnische Arbeiten zu beurteilen, mögliche Gefährdungen zu erkennen und geeignete Schutzmaßnahmen abzuleiten. Eine berufsgenossenschaftliche Information „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen“ (BGI 8686) erarbeitete die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung gemeinsam mit Automobilherstellern und Verbänden (DGUV, 2010). Die BGI 8686 enthält Informationen zur Gefährdungsbeurteilung, zum geltenden Regelwerk im Kontext Hochvolt im Fahrzeug und zu Qualifizierungsmaßnahmen in den entsprechenden Qualifizierungsstufen.

Die BGI 8686 differenziert in die Qualifizierung für Arbeiten in Entwicklung und Fertigung (OEM, Zulieferer) sowie in die Qualifizierung für Arbeiten an Serienfahrzeugen (Servicewerkstätten). Im erstgenannten, die Automobilindustrie betreffenden Bereich kann nochmals nach „Start-of-Production“ (SoP) unterschieden werden. Höhere Kompetenzanforderungen sind in Breite und Tiefe vor allem für „vor-SoP-Beschäftigte“ zu konstatieren, was sowohl für Ingenieure und Techniker als auch für Facharbeiter gilt. Für Arbeiten vor Produktionsstart sind in der BGI 8686 drei Qualifizierungsstufen definiert.

- Stufe 1 beinhaltet alle nicht-elektrotechnischen Arbeiten, die an einem Fahrzeug mit HV-System durchgeführt werden (Karosseriearbeiten, Testfahrten, Öl- und Radwechsel, aber: „Hände weg von Orange!“). Die Beschäftigten müssen auf mögliche elektrische Gefährdungen hingewiesen und über die bestimmungsgemäße Verwendung des Fahrzeugs unterwiesen werden.
- Stufe 2 umfasst elektrotechnische Arbeiten im spannungslosen Zustand und die Herstellung von Spannungsfreiheit („Fünf Sicherheitsregeln der Elektrotechnik“).
- Stufe 3 beinhaltet das Arbeiten unter Spannung am Hochvolt-System, z. B. die Fehlersuche oder das Wechseln von Bauteilen unter Spannung.

Die Kompetenzanforderungen für „vor-SoP-Beschäftigte“ erhöhen sich in Folge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs stärker als für „nach-SoP-Beschäftigte“, wie auch von befragten Experten bestätigt: „Die Wirkungen auf Kompetenzanforderungen nach SoP sind relativ bescheiden. Sie können für wesentliche Bereiche dadurch abgedeckt werden, dass auf die Gefahren elektrischen Stroms sensibilisiert wird“ (Exp.).

- Beschäftigten in der Bandmontage vor Inbetriebnahme des HV-Systems sind verbindliche Arbeitsanweisungen zu vermitteln, die eine Aufklärung über Gefährdungen und dabei zu berücksichtigenden Schutzmaßnahmen beinhalten. Die Leitung und Aufsicht erfolgt durch die jeweiligen Führungskräfte. Die fachliche Richtigkeit der Arbeitsanweisungen wird durch eine Elektrofachkraft mit fundierten Fähigkeiten und Kenntnissen dieser Arbeiten überprüft.
- Mit der Inbetriebnahme des HV-Systems erhöht sich das Gefährdungspotenzial, was je nach Tätigkeit am Fahrzeug weitere Qualifizierungsmaßnahmen für die Beschäftigten erfordert. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gefährdungspotenziale kommen hier elektrotechnisch unterwiesene Personen bzw. Fachkundige mit einer Qualifizierung nach Stufe 2 oder 3 zum Einsatz.

Da diese Inbetriebnahme des HV-Systems im Pkw-Montagewerk erfolgt, sind dort neben der Hochvolt-Sensibilisierung in der Breite zumindest ab der Batterieinbetriebnahme und Nacharbeit weitere Qualifizierungsmaßnahmen im HV-Stufenkonzept erforderlich. „Für die Beschäftigten in der Produktion gibt es nur in

den Bereichen größere spezifische Weiterbildungsbedarfe, wo die neuen Komponenten unter Spannung stehen, z. B. zu Prüfzwecken. Dem Werker ist es letztendlich egal, ob er ein Mechanik-Bauteil montiert oder ob er eine Blackbox mit Elektronik anschraubt und verklebt“ (Exp.). In der bei ELAB im Fokus stehenden Antriebsstrangproduktion, also in Aggregate- bzw. Komponentenwerken von OEM und Zulieferern, ist eine zusätzliche Hochvolt-Qualifizierung allerdings nur in einer überschaubaren Anzahl von Bereichen erforderlich.¹

7.2.6 Nationale Plattform Elektromobilität – Folgerungen für Qualifizierung

Im Rahmen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) konzentrierte sich eine von sieben Arbeitsgruppen auf die Thematik „Ausbildung und Qualifizierung“ (AG 6). Die AG 6 hat sich ausführlich mit beruflicher und mit akademischer Bildung befasst. Es wurden Empfehlungen herausgearbeitet, um den Aus- und Weiterbildungsbereich auf die Zielsetzung auszurichten, Deutschland bis 2020 zum Leitanbieter und zum Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln (NPE-AG 6, 2010).² „Elektromobilität made in Germany“ solle dabei für systemische Lösungen stehen, die Klima- und Ressourcenschutz mit Technologieführerschaft, neuer Wertschöpfung und Schaffung von Arbeitsplätzen verbinden (Bräunig, 2012). Mit diesen von Politik und Wirtschaft formulierten Zielsetzungen ist einer der „anspruchsvollsten technologischen Transformationsprozesse der vor uns liegenden Jahrzehnte“ verbunden (Müller, 2012, S. 292).

Im Bereich akademischer Bildung wird von der NPE der Bedarf an einer Vielzahl neu ausgebildeter Fachkräfte für Elektromobilität identifiziert. Die ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Elektro-/Informationstechnik seien inhaltlich gut aufgestellt; es sei also kein Bedarf an neuen Studiengängen erkennbar. Kurzfristiges Ziel müsse sein, die für die Elektromobilität relevanten ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge systemorientiert zu vernetzen und interdisziplinär auszurichten. Bedarfe gibt es insbesondere für drei Kernthemen der Elektromobilität: die Elektrochemie bzw. die Batterieforschung, die Leistungselektronik und den Leichtbau (NPE-AG 6, 2010).

Für die berufliche Bildung wird konstatiert, dass in den letzten Jahren im gewerblich-technischen Bereich moderne, zukunftsorientierte Berufsbilder entwickelt und umgesetzt wurden, die den Qualifikationsanforderungen im Technologiewandel gerecht werden. Diese Berufsbilder seien offen für die Integration neuer Qualifikationsinhalte, wie sie sich aus den Tätigkeitsfeldern und Geschäftsprozessen der Elektromobilität ableiten. Weder in der Berufsausbildung noch in der Fortbildung seien neue Berufsprofile erforderlich. Notwendig sei allerdings die Entwicklung und Integration der elektromobilitäts-spezifischen Qualifizierungsinhalte. „Für den Bereich

¹ Eine Konkretisierung der Thematik „Umgang mit Hochvoltsysteme“ für spezifische Fragen der Aus- und Weiterbildung erfolgt in den entsprechenden Kapiteln Ausbildung / Weiterbildung.

² Nach Ansicht der „Expertenkommission Forschung und Innovation“ (EFI) muss die Zielsetzung „Leitmarkt“ und „Leitanbieter“ differenziert betrachtet werden: Demnach werde in China und nicht in Deutschland ein Leitmarkt im Bereich Elektromobilität entstehen. „Deutschland hat aber die Chance, Anbieter von Fahrzeugkomponenten, Informations- und Kommunikationstechnologie und hochwertigen Elektroautomobilen zu werden. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Entwicklung einer abgestimmten Strategie zwischen deutscher Industrie, staatlichen Stellen und Forschungseinrichtungen sinnvoll“ (EFI, 2012, p. 108).

der beruflichen Weiterbildung vollzieht sich dies vorteilhafterweise im Rahmen einer arbeitsprozessorientierten Qualifizierung“ (NPE-AG 6, 2010, S. 9).

Diese Ergebnisse der Nationalen Plattform Elektromobilität wurden bei der Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität (NBE) im Juni 2011 in Ulm im Wesentlichen bestätigt. Das Oberziel im Bereich Bildung und Qualifizierung müsse sein, die interdisziplinäre und branchenübergreifende Zusammenarbeit in systemorientierten Bildungsgängen und Qualifizierungskonzepten zu fördern. Kompetenzanforderungen liegen im Bereich der Technik breit gestreut in den Feldern Elektrochemie, Batterietechnik, Leistungselektronik, Elektromotorenbau, elektromagnetische Verträglichkeit, Hochvolt-Systeme, Automobilinformatik, Leichtbau, Produktionstechnologie, Thermomanagement, usw.

Fazit der NBE für die berufliche Ausbildung im dualen System ist, dass neue Qualifikationen zwar erforderlich seien, aber keine neuen Ausbildungsberufe benötigt werden. Neue Module wie z. B. der Umgang mit Hochvolt-Systemen können in die bestehenden, flexiblen Berufsbilder integriert werden.

Fazit der NBE für die akademische Ausbildung ist, dass keine neuen Studienfächer erforderlich seien, sondern eine Anpassung bei Studieninhalten an Erfordernisse, die aus der Elektromobilität resultieren sowie neue Kombinationen und die Vernetzung bestehender Studienfächer.

Fazit für den Bereich der Qualifizierung ist, dass spezifische Fort- und Weiterbildung klar erforderlich sei (z. B. im Bereich Umgang mit Hochvolt-Systemen). Es sollten arbeitsprozessorientierte Lernkonzepte entwickelt und erprobt werden. Als wichtig wurde angesehen, dass die Unternehmen ihre Belegschaften in der Breite „im Technologiewandel mitnehmen“ und „Begeisterung für Elektromobilität wecken“.

Als überaus wichtig wurde bei der NBE die Standardisierung von Qualifizierungsinhalten und -abschlüssen hervorgehoben. Gerade im Feld der Hochvolt-Qualifizierungen gibt es eine dynamische Entwicklung hin zu einem immer heterogeneren Anbieterspektrum und einer damit einhergehenden Vielfalt an Qualifizierungsangeboten. Letztlich darf es – so der zuständige Referatsleiter beim BMBF – „keine unternehmensspezifischen oder regionalen Insellösungen geben. Ziel muss vielmehr die Standardisierung der Aus- und Weiterbildungsinhalte sein. Als ein sehr wichtiges Ergebnis von Ulm kann deshalb auch die Verabredung der Ausbildungsbeauftragten der Automobilunternehmen festgehalten werden, einen solchen gemeinsamen Ansatz zu entwickeln“ (Katenkamp, 2011, S. 3). Abschließend wurde bei der NBE die Entwicklung einer „Kompetenzroadmap Elektromobilität“ vereinbart, die dann im Mai 2012 veröffentlicht wurde.

7.2.7 Arbeitsschutz und arbeitswissenschaftlich relevante Veränderungen

Die Produktion von Hybrid- und Elektroautos und ihrer neuen Antriebsstrang-Komponenten stellt eine Herausforderung auch für den Arbeitsschutz dar. Durch den Elektroantrieb treten Gefährdungen auf, die in der Automobilindustrie bisher unbekannt waren. Neu für die Branche sind z. B. Hochvolt-Systeme mit Spannungen bis zu 1.000 Volt. Eine Abschätzung arbeitswissenschaftlich relevanter Veränderungen durch Elektromobilität wurde Anfang 2012 veröffentlicht (Enderlein, Krause, & Spanner-Ulmer, 2012). Das von der Professur für Arbeitswissenschaft (Prof. Spanner-Ulmer) an der TU Chemnitz erstellte Gutachten wurde von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) beauftragt. Im Fokus der Studie steht die Frage nach möglichen Auswirkungen der Elektromobilität auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz und daraus abzuleitender Forschungs- und Handlungsbedarf.

Die stärkste Auswirkung auf den Arbeitsschutz hat – so ein Fazit der Studie – der Umgang mit Traktionsbatterien, also in der Regel mit leistungsstarken Energiespeichern auf Lithium-Basis. Insbesondere in Produktions- und Werkstattbereichen müsse mit Gefahren durch höhere Spannungen (Umgang mit Hochvolt-Systemen) und durch zusätzliche Gefahrstoffe (z. B. Lithium) gerechnet werden. Für weitere Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs bestehe kein außergewöhnlicher oder spezifischer Handlungsbedarf für den Arbeitsschutz.

Arbeitsschutzrelevante Veränderungen durch Elektromobilität bzw. potenzielle Gefahren durch Lithium-Ionen-Hochvolt-Batterien, die im BAuA-Gutachten hervorgehoben werden, sind:

- Gefahr durch hohe Spannungen (elektrische Gefahren): Durch den Einsatz von Hochvolt-Technik werden die Beschäftigten rund um Hybrid- und Elektrofahrzeuge größeren Gefahren ausgesetzt sein. Beim Berühren von spannungsführenden Teilen kann es zu einem tödlichen elektrischen Schlag kommen.
- Gefahr durch austretende Inhaltsstoffe (chemische und thermische Gefahren): Die neue Antriebstechnologie macht auch den Umgang mit neuen Gefahrstoffen erforderlich, die vor allem in den Hochvoltbatterien auf Lithiumbasis eingesetzt werden. Während der Batteriemontage und auch beim späteren Verbau im Fahrzeug kommt es im Regelfall zu keinem Kontakt mit Gefahrstoffen der Batteriezellen. Gefährdungen für die Beschäftigten entstehen „erst in Folge mechanischer Beschädigungen, Kurzschlüssen oder zu starkem Laden bzw. Entladen einer einzelnen Zelle; die Zelle kann instabil werden, erhitzt sich stark und es besteht akute Brandgefahr sowie Gefährdung durch austretende Inhaltsstoffe“ (Enderlein, Krause, & Spanner-Ulmer, 2012, S. 20). Somit entsteht im Arbeitsprozess vor allem dann ein Gefährdungsrisiko, wenn das Batteriesystem beschädigt wird, was chemische Reaktionen der eingesetzten Stoffe mit entsprechenden Verletzungen zur Folge haben kann.
- Belastungsrelevante Aspekte: Physische Belastungen sind durch das Handling schwerer Bauteile¹ zu erwarten. Gerade die manuelle Lastenhandhabung ist aus arbeitswissenschaftlicher Sicht problematisch, da sich die physischen Belastungen auf das Muskel-Skelett-System auswirken. Psychische Belastungen wie Ängste und Stress können aus dem Umgang mit Hochvoltkomponenten resultieren: „Der Druck Bildungsmaßnahmen beiwohnen zu müssen, ist dabei ebenso eine Belastung für Mitarbeiter, wie die Angst vor Verletzungen durch den Umgang mit diesen Komponenten oder dem Verlust des Arbeitsplatzes an andere Berufsgruppen, beispielsweise Elektriker“ (Enderlein, Krause, & Spanner-Ulmer, 2012, S. 25).

Das BAuA-Gutachten hebt hervor, dass das Gefährdungspotenzial vorrangig durch den Einsatz von Hochvoltbatterien und durch das Hochvoltnetz im Elektroauto bestimmt ist. „Um die Gefahren in der Arbeitswelt zu begrenzen, gibt es folglich einen großen Bedarf an Qualifikation“ (Enderlein, Krause, & Spanner-Ulmer, 2012, S. 24). Qualifikatorische Anforderungen werden in erster Linie beim Umgang mit Hochvolt-Systemen und der entsprechenden Qualifikation zur Elektrofachkraft (BGI 548) bzw.

¹ Im BAuA-Gutachten wird hier vor allem auf schwere Traktionsbatterien verwiesen. Die entsprechenden Bauteile können auf ein Einzelgewicht von über 15 kg kommen, Batteriesysteme insgesamt können bis zu 500 kg schwer sein (Schurer, 2011). In den ELAB-Expertengesprächen spielte in diesem Zusammenhang nicht nur die Traktionsbatterie, sondern auch das Handling des schwereren Traktionselektromotors und der im Vergleich zu anderen Steuergeräten deutlich schwereren Leistungselektronik eine Rolle.

der Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen (BGI 8686) gesehen. Darüber hinaus sind im Kontext Arbeitsschutz die Gestaltung und technische Ausstattung der Arbeitsplätze sowie die Arbeitsorganisation von Bedeutung. Für die Arbeitsplatzgestaltung empfiehlt das BAuA-Gutachten geeignete Handlinggeräte und speziell ausgelegte Werkzeuge, gleichzeitig müssen für Lagerung und Transport von Gefahrgut bestimmte Auflagen erfüllt werden. Im Feld der Arbeitsorganisation betont das BAuA-Gutachten, dass für die Arbeit an Elektrofahrzeugen nur unterwiesenes Fachpersonal eingesetzt werden kann. Entsprechend bestehe eine direkte Abhängigkeit zwischen Arbeitsplanung und der Verfügbarkeit bereits qualifizierter Beschäftigter. Empfohlen werden Rotationsmaßnahmen, um übermäßige einseitige Belastungen zu begrenzen und Teamarbeit, z. B. gemischte Teams aus Mechanikern und Elektrikern, um die Qualität des gesamten Arbeitsablaufs sicherzustellen.

In der BAuA-Studie wird der Fokus bei der Bewertung von Auswirkungen der Elektromobilität auf die menschliche Arbeit auf die Entwicklung, Montage und den Verbau von Hochvoltbatterien gelegt, was die Gutachter als Ergebnis ihrer Empirie (Literaturrecherche und Expertengespräche) begründen. „Die Herausforderungen für den Arbeitsschutz bestehen vor allem in der Anpassung und Umsetzung bestehender Sicherheitsanforderungen für die Produktions- und Werkstattbereiche, die insbesondere mit Gefahren durch höhere Spannungen und zusätzliche Gefahrstoffe (z. B. Lithium) rechnen müssen“ ... Eine besondere Bedeutung kommt der „Qualifizierung und Weiterbildung des vorhandenen Fachpersonals und der Ausbau der beruflichen und akademischen Bildung zu“ (Enderlein, Krause, & Spanner-Ulmer, 2012, S. 58).

7.3 Ausbildung

Die Berufsausbildung im dualen System hat in Deutschland eine nach wie vor hohe Bedeutung, als Basis für qualifizierte Facharbeit ist sie ein essentieller Bestandteil des deutschen Innovationssystems. Das Ziel beruflicher Bildung ist die berufliche Handlungsfähigkeit, die sich aus einem spezifischen Mix aus Fachkompetenz, Methodenkompetenz, sozialer Kompetenz und personaler Kompetenz zusammensetzt. Quer zu diesen Feldern beruflicher Handlungsfähigkeit steht die Innovationskompetenz, die inhaltlich mit Begriffen wie z. B. „Interdisziplinarität“, „Prozess- und Systemkompetenz“, „Könnensbewusstsein“ gefüllt werden kann (Ehrke, Brötz, & Gerdes, 2012).

Die klassischen gewerblich-technischen Ausbildungsberufe in der heutigen Antriebsstrangproduktion (Verbrennungskraftmaschine, Getriebe, etc.) sind Industriemechaniker/in, Mechatroniker/in, Kfz-Mechatroniker/in, Elektroniker/in (z. B. für Automatisierungstechnik), Fertigungsmechaniker/in, Werkzeugmechaniker/in, Gießereimechaniker/in, Zerspanungsmechaniker/in, technische/r Modellbauer/in, Metallwerker/in, Fachkraft für Lagerlogistik etc.

In den letzten Jahren ist in der Automobilindustrie ein Wandel im Mix der Ausbildungsberufe zu beobachten. In der Antriebsstrangproduktion, aber auch in den Pkw-Montagewerken, erfolgt eine Verschiebung von „reinen“ Metallberufen in Richtung mechatronische Berufe (Mechatroniker/in und Kfz-Mechatroniker/in) und industrielle Elektroberufe (Elektroniker/in für Automatisierungstechnik, ... für Maschinen und Antriebstechnik, ...). Dieser strukturelle Wandel im Berufemix von Metall- und Mechanik-Berufsbildern (M/M-Berufe) hin zu Elektrik- und Elektronik-Ausbildungsberufen (E/E-Berufe) war in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten vor allem durch die immer höheren E/E-Anteile im Pkw (vom elektrischen Fensterheber bis zum Infotainment) und die immer stärkere Automatisierung in der Produktion bedingt. „Bis vor wenigen Jahren haben wir 2/3 unseres gewerblich-technischen

Nachwuchses in Metallberufen und 1/3 in elektronischen und mechatronischen Berufen ausgebildet. Seit kurzem liegen wir bei 50:50“ (Exp.).

Heute kommt als weiterer Treiber für den Wandel im Berufemix hin zu E/E-Berufen die Elektrifizierung des Antriebsstrangs hinzu. Die inhaltlichen Facetten der Elektromobilität werden durch die vorhandenen Ausbildungsprofile der Elektroberufe und der Kfz-Berufe weitgehend abgedeckt. „Zukünftig werden wohl eher die Berufe der Elektroindustrie stärker im Fokus der Automobilhersteller und Zulieferer stehen. ... Die industriellen Elektroberufe ermöglichen es den Unternehmen, handlungsfähige Fachkräfte im Bereich der Elektromobilität auszubilden“ (IG Metall, 2010, S. 4).

Bei einigen Unternehmen der Automobilindustrie zeigt sich – mit dem Wandel im Berufemix verbunden – im Ausbildungsplatzangebot ein Wandel hin zu qualitativ immer hochwertigeren Berufen und daraus resultierenden wachsenden kognitiven Anforderungen der Facharbeiterausbildung. Zum Beispiel wurde in einem großen Komponentenwerk eines OEM der Ausbildungsberuf Fertigungsmechaniker/in, vom Kern her ein Montageberuf, vor kurzem durch inhaltlich anspruchsvollere Berufe ersetzt: „Wenn wir schon weniger junge Leute ausbilden, dann wenigstens in qualitativ hochwertigen Berufen“ (Exp.). Gleichzeitig verschiebt sich das Ausbildungsangebot von klassischer dualer Berufsausbildung hin zur Kombination der betrieblichen Ausbildung mit einem Studium an einer Dualen Hochschule. Ebenso kann bei manchen OEM der Erwerb der Fachhochschulreife mit der klassischen Ausbildung kombiniert werden.

Ausbildungsberufe für die Elektromobilität – „ein dynamisches Innovationsfeld bietet spannende Perspektiven“ – stellt eine Broschüre des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vor (BMBF, 2011). Darin wird berufliche Bildung für die verschiedenen Handlungsfelder entlang der Prozesskette Elektromobilität dargestellt. Neben dem für ELAB relevanten Bereich „Fahrzeugtechnik (eCar)“ geht die BMBF-Broschüre auf die Bereiche „Infrastruktur (Netze)“, „Infrastruktur (Stationen)“, „Systemdienstleistungen“ und „Fahrzeugservice / -handel“ ein. Für „Fahrzeugtechnik (eCar)“ sind außer den im folgenden Zitatkasten dargestellten sieben Ausbildungsberufen noch „eine ganze Reihe von Berufen, die direkt oder indirekt mit Elektromobilität in Verbindung stehen – wie etwa Industriemechaniker oder Industriekaufleute“ relevant.

„Im Handlungsfeld Fahrzeugtechnik (eCar) sind bei der Herstellung von elektrischen Antriebssystemen in erster Linie die industriellen Elektroberufe relevant. *ElektronikerInnen für Maschinen- und Antriebstechnik* bauen die Motoren. *ElektronikerInnen für Geräte und Systeme* prüfen und testen die Motorsteuerungen und Antriebsregelungen und bauen die elektronischen Komponenten. *SysteminformatikerInnen* implementieren Softwarekomponenten, konfigurieren Baugruppen und programmieren die eingebetteten Systeme. *MechatronikerInnen* bauen die Systemkomponenten im Fahrzeug zusammen und prüfen die Funktionen. *ElektronikerInnen für Automatisierungstechnik* sind gefragt, wenn die neuen automatisierten Produktlinien entstehen. Dies tun sie gemeinsam mit *ProduktionstechnologInnen*, die neue Produktionsanlagen einrichten und die hohen Standards einer Serienproduktion sichern.“ ...

„*Kfz-MechatronikerInnen* sind die Spezialisten für fahrzeugtechnische Systeme und die damit verbundenen Prüf- und Diagnosetätigkeiten“

Abbildung 105: Ausbildungsberufe „Fahrzeugtechnik (eCar)“ (BMBF, 2011, S. 10, 20).

Für diese Ausbildungsberufe von Elektroniker/in über Mechatroniker/in, Systeminformatiker/in bis hin zu Kfz-Mechatroniker/in sind breit angelegte Qualifikationspro-

file und ein ganzheitliches Berufsverständnis charakteristisch. „Diese prozessorientierten Berufsbilder sind offen für die Integration neuer Qualifikationsinhalte und bieten überall dort große Vorteile, wo – kennzeichnend für die Tätigkeitsfelder des Technologiefelds Elektromobilität – dynamischer Wandel, vielfältige Innovationen oder komplexe Fragestellungen für Herausforderungen im Arbeitsalltag sorgen“ (BMBF, 2011, S. 12). So gehört es z. B. bei Daimler zur „greenHR-Strategie“ im Bereich Ausbildung, „'grüne' Kompetenzen in bestehende Berufsbilder“ zu integrieren (Daimler, 2012, S. 88).

Die Integration neuer Qualifikationsinhalte wird derzeit bei Kfz-Mechatronikern in industrieller Ausbildung erprobt, indem der Umgang mit Hochvolt-Systemen als Zusatzqualifikation angeboten wird. Hochvolt-Systeme sind bislang nicht Bestandteil des Berufsbilds Kfz-Mechatroniker/in, eine Überarbeitung des Berufsbilds soll aber in den nächsten Jahren erfolgen. Eine entsprechende, in die Ausbildung integrierte Zusatzqualifikation bietet z. B. die IHK Region Stuttgart seit 2010 an. Die „Zusatzqualifikation Fachkraft für elektrotechnische Arbeiten an Hochvolt-Systemen in Fahrzeugen für Auszubildende im Ausbildungsberuf Kraftfahrzeugmechatroniker/-in“ (IHK Region Stuttgart, 2010) erfolgt mit insgesamt 160 Stunden Theorieunterricht, der in die Berufsschule integriert ist (einmal monatlich ein zusätzlicher Tag). Dazu kommt ein Praxisteil mit einem Umfang von mindestens 40 Stunden. Genutzt wird diese Zusatzqualifikation von Stuttgarter Ausbildungsbetrieben wie z. B. Behr, Daimler und Porsche.

Der mit dem Schlagwort „von M/M- zu E/E-Ausbildungen“ beschriebene Wandel im Mix der Ausbildungsberufe insgesamt kann exemplarisch am Ausbildungsberuf Kfz-Mechatroniker/in beschrieben werden. Der Ausbildungsschwerpunkt lag beim Kfz-Mechatroniker lange Zeit im mechanischen Bereich, oder wie ein befragter Experte zuspitzte im „Metall-Block“. Zukünftig werden Kfz-Mechatroniker/innen sich immer stärker mit dem „Elektronik-Block“ auseinandersetzen müssen, die Zusatzqualifikation „Umgang mit Hochvolt-Systemen“ sei nur ein erster Schritt in diese Richtung (Exp.). Letztlich werde ein an sich schon breiter und anspruchsvoller Ausbildungsberuf nochmals angereichert um Hochvolt-Systeme sowie z.B. Leistungselektronik und Regelungstechnik. „Mit dieser Anreicherung von E/E-Themen wird so mancher Auszubildender systematisch überfordert“ (Exp.). Gleichzeitig wird die E/E-Anreicherung jedoch auch als notwendig für zukünftige berufliche Perspektiven angesehen: „Ein Kfz-Mechatroniker, der heute ausgebildet wird, ist über 2050 hinaus im Beruf und wird bereits in 10 bis 15 Jahren sehr viele elektrifizierte Fahrzeuge vorfinden und damit umgehen müssen“ (Exp.).

Die für den Umgang mit Hochvolt-Systemen erforderliche Qualifizierung zur Elektrofachkraft ist bei OEM zunehmend in die Ausbildung zum Kfz-Mechatroniker integriert, bei Daimler beispielsweise seit dem Einstelljahrgang 2010. Und bei Audi haben sich in einem Pilotprojekt 2011 erstmals 25 Kfz-Mechatroniker während ihrer Ausbildung als Elektrofachkraft Fahrzeugtechnik – mit Schwerpunkt sicherer Umgang mit Hochvolttechnik – qualifiziert und unmittelbar nach Ausbildungsabschluss die entsprechende IHK-Prüfung abgelegt (Audi, 2012). „Die im Rahmen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs aufkommende Hochvolt-Thematik ist bei den Ausbildungsberufen in erster Linie für den Kfz-Mechatroniker relevant“ (Exp.). Zum selben Ergebnis kam eine interne Untersuchung eines Automobilherstellers zu Wirkungen der Elektromobilität auf die Ausbildung bereits vor einigen Jahren. Demnach sei von der Elektrifizierung des Antriebsstrangs in erster Linie der Ausbildungsberuf Kfz-Mechatroniker/in betroffen, bei dem die neuen Anforderungen mit einer Zusatzqualifikation abgedeckt werden könnten (Exp.).

Für die sukzessive Elektrifizierung des Antriebsstrangs sind wandlungsfähige Produktionssysteme enorm wichtig. In diesem Kontext könnte der 2008 eingeführte, bisher

wenig verbreitete Ausbildungsberuf Produktionstechnologe/in stärkere Beachtung finden. „Der Produktionstechnologe ist ein neuer Facharbeitertyp mit einer umfassenden Handlungskompetenz im Bereich klassischer Fertigungsverfahren wie auch innovativer Produktionstechnologien“ (Müller, 2012, S. 287). Dieser von VDMA und IG Metall etablierte, innovative Ausbildungsberuf ermöglicht es den Betrieben, agil auf sich verändernde technische Anforderungen zu reagieren. Die Einsatzgebiete liegen im Workflow zwischen Entwicklung und Produktion, in der Vor- oder Nullserie und im Produktionsanlauf. Im Vergleich zum Mechatroniker, der durch Systemkompetenz charakterisiert werden kann, ist die Qualifikation beim Produktionstechnologen durch Prozesskompetenz gekennzeichnet, die Produktionstechnik, Produktionsorganisation und IT-Einsatz integrativ verbindet. Gerade an der Schnittstelle von Entwicklung und Produktion könnten die prozessorientierten, produktions- und informationstechnischen Kompetenzen des Produktionstechnologen wichtig für die Innovationsfähigkeit der Betriebe werden (Ehrke, Brötz, & Gerdes, 2012, S. 321).

Zusammenfassend ist für die gewerblich-technische Ausbildung festzuhalten, dass es einen starken Trend hin zu mechatronischen und vor allem E/E-Berufen gibt und dass sich gleichzeitig auch innerhalb des Berufsbildes Kfz-Mechatroniker/in die E/E-Anteile sukzessive erhöhen. Ansonsten gab es bei den im Rahmen der ELAB-Studie befragten Experten eine breite Übereinkunft, dass in der gewerblich-technischen Ausbildung in den nächsten Jahren vor allem die für den Umgang mit Hochvolt-Systemen notwendige Zusatzqualifikation eine wichtige Rolle spielen wird. Diese gilt es nicht nur in der Kfz-Mechatroniker/in-Ausbildung zu verankern, sondern auch „für die anderen Ausbildungsberufe in der Automobilindustrie sollten klar definierte ‚Aufsetzpunkte‘ für das Vermitteln der verschiedenen Stufen der Hochvolt-Qualifizierung geschaffen werden“ (Exp.). Darüber hinaus ist es für alle Auszubildenden über die gesamte Prozesskette des Automotive-Bereichs von Vorteil, wenn ihnen breit angelegte Kenntnisse und systemisches Wissen zur Elektromobilität vermittelt werden.

7.4 Weiterbildung

Neue Kompetenzanforderungen, die aus dem Technologiewandel resultieren, führen zu Qualifikationsbedarfen, die einerseits durch Ausbildung neuer Fachkräfte abgedeckt werden, andererseits durch Fort- und Weiterbildung – und hier ist die große Frage und Herausforderung: Wie stellen die Unternehmen die vorhandenen Beschäftigten, die heute in Entwicklung, Fertigung, Montage, Logistik und in den Werkstatt-/Servicebereichen tätig sind, auf den Technologiewandel Elektromobilität ein? Es werden Antworten für alle betroffenen Beschäftigtengruppen benötigt.¹ Da bei der ELAB-Studie die Produktion von Antriebssträngen und ihren Komponenten im Zentrum steht, werden im Folgenden die heute absehbaren Konsequenzen für dort tätige Beschäftigtengruppen diskutiert – zunächst übergreifend für die Antriebsstrangproduktion, in den folgenden Kapiteln dann spezifisch für die neuen Komponenten der alternativen Antriebsstränge: Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik, Brennstoffzellensystem.

¹ So hat z. B. der Personalbereich von Daimler die strategische Initiative „greenHR“ eingeleitet. Ziel von „greenHR“ ist es, künftige Personalanforderungen und die Rahmenbedingungen in den fünf Feldern „Personalbedarfsanalyse und -planung“, „Recruiting“, „Ausbildung“, „Weiterbildung“ und „Personalentwicklung“ proaktiv zu gestalten (Daimler, 2012, p. 152).

Die Produktion konventioneller Antriebsstränge ist jedoch nicht nur mit dem mit der sukzessiven Elektrifizierung des Antriebsstrangs verbundenen Technologiewandel konfrontiert, sondern auch mit der Optimierung der konventionellen Komponenten Verbrennungsmotor und Getriebe, um eine Verbrauchsminderung zu erreichen. Aus den Optimierungskonzepten resultierende Produktionsprozesse mit erhöhten Genauigkeits- und Reinraumanforderungen verändern die Kompetenzanforderungen an die hier Beschäftigten: „Kompetenzen rund um Reinraumtechnologien bekommen in der konventionellen Komponentenproduktion einen hohen Stellenwert und das Thema ‚Sorgfalt‘ wird immer wichtiger“ (Exp.).

Alles in allem geht es für die Unternehmen im Technologiewandel darum, die berufliche Handlungskompetenz der Beschäftigten über gezielte Weiterbildung an die neuen Herausforderungen anzupassen. Methodisch sollte hier verstärkt das Konzept der arbeitsprozessorientierten Weiterbildung zum Zuge kommen, bei dem Arbeiten und Lernen eng miteinander verknüpft sind. Arbeitsprozessorientiertes Lernen setzt gezielt an den alltäglichen Arbeitsprozessen im Betrieb an. Als Voraussetzung dafür müssen lernförderliche Rahmenbedingungen geschaffen werden (BMBF, 2011). Inhaltlich könnte – so ein Beispiel aus dem Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität – die Fortbildung „Prozessmanager/in – Produktionstechnologie“ einen wichtigen Baustein bilden. „Der Prozessmanager – Produktionstechnologie“ führt das Prozessmanagement für die Produktion und die damit verbundenen Innovations- und Verbesserungsvorhaben. Auch das Projektmanagement von komplexen Projekten in der Produktion gehört dabei zu seinen Aufgaben. In diesen Zusammenhängen ist er in der Produkt- und Prozesskonzeption, in der Prozessentwicklung und -implementierung, im Produktionsanlauf oder in der Produktionsplanung und -steuerung tätig“ (NPE-AG 6, 2010, S. 9). Weitere Möglichkeiten der berufsbegleitenden Qualifizierung für Fachkräfte mit elektrotechnischer Ausbildung bietet das 2009 in Kraft getretene Weiterbildungssystem der Elektrotechnikindustrie.

Ein wichtiges Qualifizierungsthema, das von den befragten Experten hervorgehoben wurde, ist der Umgang mit Hochvolt-Systemen. Das im entsprechenden Kapitel bereits beschriebene Stufenkonzept nach der BGI 8686 wurde von Unternehmen der Automobilindustrie bereits implementiert, wie im Folgenden exemplarisch dargestellt:

- Audi bietet die Weiterbildung zur „Elektrofachkraft Fahrzeugtechnik“ an, deren erste Absolventen im März 2010 ihre Zertifikate erhielten. Das Weiterbildungskonzept wurde im Hinblick auf die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von der Audi AG zusammen mit der IHK Akademie München erarbeitet. Dabei stehen der Umgang mit Hochvolt-Technik und das Thema Arbeitsschutz im Zentrum. In Form eines mehrstufigen Qualifizierungskonzepts werden die Fachkräfte für den kompetenten Umgang mit Hochvolt-Systemen geschult. Über dem „elektrotechnischen Laien“, der keine Arbeiten am Hochvolt-Fahrzeug durchführen darf, kommen auf der ersten Stufe die „sensibilisierten Personen“, die z. B. Hochvolt-Komponenten im spannungsfreien Zustand verbauen dürfen. Zweite Stufe ist die „Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten“ (EfffT), die mit Arbeitsanweisung am Hochvolt-Fahrzeug bestimmte Arbeiten ausführen darf. Dritte Stufe ist die „Elektrofachkraft Fahrzeugtechnik“, die zum eigenständigen Arbeiten am Hochvolt-Fahrzeug berechtigt. Darüber ist die Elektrofachkraft mit Zusatzqualifikation „Arbeiten unter Spannung“ und – in der Spitze der Pyramide – die „Verantwortliche Elektrofachkraft“ (VEFK) angesiedelt. VEFK ist, wer als Elektrofachkraft die Fach- und Aufsichtsverantwortung übernimmt und vom Unternehmen dafür beauftragt ist (Smolik, 2011).
- Daimler hat in den Werken eine Organisation qualifizierter Elektrofachkräfte im Bereich Hochvolt-Systeme in Kraftfahrzeugen aufgebaut. Dafür wurden drei Funk-

tionen eingeführt: die Verantwortliche Elektrofachkraft (VEFK), die Elektrofachkraft mit Fachverantwortung (EFKmF, z. B. erforderlich in Nacharbeit und Inbetriebnahme) und die Fachkraft für Hochvolt-Systeme in Kraftfahrzeugen (FFHV), die unter Aufsicht einer EFKmF ein Hybrid- bzw. Elektroauto nach Arbeitsanweisung aufbauen darf.

- Opel bildet seit Anfang 2009 den „Systemtechniker Elektromobilität“ mit IHK-Zertifikat aus. Diese Qualifizierung im Opel-Zentrum für alternative Antriebe in Mainz-Kastel richtet sich an Kfz-Mechatroniker und Mechatroniker, die künftig als „Fachexperten Hochvolt Kfz“ in den Werkstätten und in der Prototypenentwicklung arbeiten wollen. Das sogenannte Nivellierungsmodul ist die Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten. Im folgenden Basisqualifikationsmodul erfolgt die Vermittlung von Elektromobilitätsgrundwissen, das in konkreten Projekten im Werkstattbereich angewendet wird. Im Spezialisierungsmodul wird auf betriebsbezogene Projekte im Kontext von Elektromobilität spezialisiert (Seeberg, 2011).
- ZF organisiert den „Elektrobereich elektrische Fahrtriebe“ mittels Verantwortungsübertragung an eine „Gesamtverantwortliche Elektrofachkraft“ (G-VEFK), die im elektrotechnischen Umfeld weisungsbefugt ist. In der zweiten Hierarchiestufe gibt es „Bereichsverantwortliche Elektrofachkräfte“ (B-VEFK). Durch die VEFK werden in den einzelnen Bereichen, z. B. Hybridantrieb, „Fachkundige für elektrische Fahrtriebe“ (FEFA) ernannt, die über ein Schulungszertifikat entsprechend BGI-8686 und einen Einarbeitungsnachweis verfügen müssen (Litz, 2011).

In den Aggregatewerken und Montagewerken – also nach den Werksstrukturen der OEM gegliedert – ist die Beschäftigtenanzahl mit Weiterbildungsbedarfen im Bereich Hochvolt sehr unterschiedlich. Beim Bau von Hybrid- oder Elektroautos entsteht in den Pkw-Montagewerken der OEM für zahlreiche Beschäftigte Weiterbildungsbedarf im Bereich Umgang mit Hochvolt-Systemen. In den Aggregatewerken, in denen die Komponenten des Antriebsstrangs produziert werden, werden nur wenige Beschäftigte, z. B. in der Entwicklung und in der Inbetriebnahme, mit der Hochvolt-Thematik konfrontiert. In der Antriebsstrangproduktion erfolgt in der Regel eine bedarfsorientierte Qualifizierung für den Umgang mit Hochvolt-Systemen, z. B. zur Elektrofachkraft Hochvolt-Systeme für Kfz-Mechatroniker, oder z. B. zur elektrotechnisch unterwiesenen Person für Industriemechaniker. Es werden nur diejenigen, die mit Hochvolt „in Berührung kommen“, entsprechend qualifiziert. In der Getriebemontage werden beispielsweise die Teile für das Hybridgetriebe spannungslos verbaut, es ist also irrelevant, ob hier ein Hybrid- oder ein konventionelles Getriebe gebaut wird. Eine Qualifizierung zum Umgang mit Hochvolt-Systemen ist erst dann erforderlich, wenn die Hybridgetriebe geprüft werden – und das wird künftig vollautomatisiert im Prüfstand geschehen (Exp.).

7.5 Komponentenspezifische Qualifikationserfordernisse

Als zentrale Komponenten alternativer Antriebsstränge wurde im Forschungsprojekt ELAB auf Traktionsbatterien, Elektromotoren, Leistungselektronik und Brennstoffzellensysteme näher eingegangen. Für diese neuen Komponenten wurden aus der Analyse der Produktionsprozesse sowie auf Basis der Expertengespräche und der Literaturoswertung spezifische Kompetenzanforderungen und Qualifikationserfordernisse unter die Lupe genommen.

7.5.1 Batterie

Traktionsbatterien, also Batterien für elektrische Kfz-Antriebe, bestehen aus drei Einzel-Komponenten: den Batteriezellen, dem Batteriemanagementsystem und dem Gehäuse mit Kühlsystem. Zweifellos ist die Traktionsbatterie – Stand der Technik ist für die nächsten Jahre die Lithium-Ionen-Batterie – eine der Schlüsselkomponenten im Hybrid- und Elektrofahrzeug. Nicht zuletzt weil der Wertschöpfungsanteil der Batterie am Gesamtfahrzeug laut Nationaler Plattform Elektromobilität bei 30 bis 40 % liegt, brauche Deutschland Standorte für eine „integrierte Zell- und Batteriesystemproduktion“ (NPE, 2011, S. 18). Bislang gibt es einen entsprechenden Standort in Deutschland: In Kamenz (Sachsen) wurde in den letzten Jahren von Daimler und Evonik in drei eigenständigen Unternehmen eine Elektrodenproduktion (Litarion GmbH), eine Zellfertigung (Li-Tec Battery GmbH) und die Herstellung kompletter Batterien (Deutsche ACCUmotive GmbH&Co.KG) in unmittelbarer Nachbarschaft aufgebaut.

In der VDMA-Studie „Zukunftsfeld Elektromobilität“ wird in erster Linie auf die Zellfertigung, verantwortlich für fast 50 % der Batteriekosten, eingegangen (Schlick, Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael, 2011, S. 16). Die Fertigung von Batteriezellen lässt sich in acht Produktionsschritte unterteilen: Mischen, Beschichten, Kalandern, Schneiden, Trocknen, Fügen/Verpacken, Befüllen/Versiegeln, Formieren/Prüfen. Die Kernprozesse der Zellfertigung sind in erster Linie das Mischen und das Beschichten; diese beiden Prozesse besitzen den größten Einfluss auf die Qualität und Leistungsfähigkeit einer Batteriezelle. Bei diesen und den Folge-Prozessen steht die Sicherstellung gleichbleibender Qualität im Vordergrund. Die hochgesteckten Qualitätsziele der Automobilindustrie sind maßgeblich durch die Weiterentwicklung der Produktionstechniken zu erreichen, aber auch durch entsprechend qualifizierte, motivierte und sorgfältige Mitarbeiter in der Produktion (Exp.).

Kernkompetenzen von Automobilherstellern liegen in den der Zell- und Modulproduktion nachgelagerten Feldern „Battery Pack Design, thermisches Management, Batteriemangement, (Hard- und Software), Fahrzeugintegration“, so der Centerleiter Produktions- und Werkstofftechnik der Daimler AG (Steegmüller, 2011, S. 23). An der Schnittstelle zwischen Batteriesystem und Fahrzeug geht es um die Integration der Faktoren „Leistung“ (aus den Zellen), „Wärme“ (aus dem Kühlsystem) und Information (aus dem Steuergerät). Entsprechend steht die Produktion von Batteriesystemen (ab Packaging) im Fokus von ELAB. Der Produktionsprozess von Batteriesystemen kann gegliedert werden in die Batteriemodulmontage und den Aufbau des Batteriesystems von der Montage des Batteriepacks bis zum End-of-Line-Test (vgl. Kap. 4). Aus dem Produktionsprozess eines Batteriesystems lassen sich die Montage bzw. Verbindungs- und Füge-technik (Arbeiten unter Spannung), Qualitätssicherung, Prüfung und Tests (Elektrik, Dichtigkeit) als wesentliche Kompetenzanforderungen ableiten.

Mit fortschreitendem Aufbau des Batteriesystems nimmt die Gefährdung durch elektrischen Schlag zu (Schurer, 2011, S. 7): Beim Modulaufbau ist ab der elektrischen Verbindung der Zellen ein Arbeiten unter Spannung bis 60 V erforderlich, bei der Batteriesystemfertigung ist ab Montage der Module bis zum End-of-Line-Test ein Arbeiten unter Spannung bis 600 V erforderlich (Fleischer, 2011, S. 38). Damit ist beim Batterie-Packaging eine Zusatzqualifikation „Umgang mit Hochvolt-Systemen“ zwingend erforderlich. In diesem Bereich ist eine hohe Automatisierung der Produktion zu erwarten, wie drei der befragten Experten betonen:

- „Für die Batteriemontage ist das Arbeiten unter Spannung die Herausforderung – schon allein deshalb ist eine möglichst hohe Automatisierung notwendig“ (Exp.).

- „Bei den Themen Automatisierung und Qualitätssicherung in der Batterieproduktion sehe ich große Handlungsbedarfe: Beim Zusammenbau der Batterie-Packs geht es um verschiedene Prüfungsaufgaben und um den End-of-Line-Test auf Dichtheit, Rüttelfestigkeit und elektrische Eigenschaften“ (Exp.).
- „Bei zukünftiger Großserienproduktion von Batteriesystemen werden vollautomatisierte Montagelinien, vollautomatisierte Test- und Prüfeinrichtungen für Beginn-of-Line- über Zwischenprüfungen bis hin zu End-of-Line-Tests eingesetzt“ (Exp.).

Ab größeren Stückzahlen ist demnach eine hochautomatisierte Batteriemontage zu erwarten. Für den Produktionsprozess werden aus heutiger Sicht zum einen gut qualifizierte Fachkräfte benötigt, u. a. auch Techniker oder Industriemeister mit hoher Prozesskompetenz, die auch in der Instandhaltung eingesetzt werden. End-of-Line und in der Nacharbeit werden Elektrotechniker eingesetzt, weitere Fachkräfte mit mittleren bzw. einfacheren Qualifikationen werden als Maschinenbediener und in der Produktionslogistik benötigt. Alles in allem – so einer der befragten Experten – sei der Personalbedarf in der Batteriemontage jedoch „überschaubar.“ Von den Kompetenzanforderungen her werden im bestehenden Montagewerken für Automotive-Batterien in erster Linie elektrotechnische Qualifikationen gesucht und – zumindest im Facharbeiterbereich – keine Fachkräfte mit (elektro-)chemischer Ausbildung.

Fachkräftebedarfe im Bereich der Traktionsbatterien sind differenziert nach den Bereichen „Blue-Collar“ und „White-Collar“ zu betrachten: „Die Blue-Collar-Bereiche können in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien mit den vorhandenen Facharbeiter-Qualifikationen inhaltlich gut abgedeckt werden. Zusätzlich erforderlich ist bei den Facharbeitern in der Regel nur die Hochvolt-Qualifizierung in den unterschiedlichen Stufen. In den hochqualifizierten White-Collar-Bereichen, insbesondere bei Wissenschaftlern und Ingenieuren, bestehen jedoch bereits große Engpässe. Speziell in der Batterieproduktion fehlt es vor allem am Prozess-Knowhow, wenn man Deutschland mit asiatischen Ländern vergleicht“ (Exp.).

Für die Frage, welche Ausbildungsberufe im Feld der Batteriemontage relevant sind, wird das gewerblich-technische Ausbildungsplatzangebot bei zwei Batterieproduzenten in Deutschland betrachtet:¹

- Hoppecke Batterien (Brilon) bietet im technischen Bereich die Ausbildungsberufe Elektroniker/in, Industriemechaniker/in, Gießereimechaniker/in, Maschinen- und Anlagenführer/in, Technischer Produktdesigner/in, Fachinformatiker/in, Chemielaborant/in (Wareneingangsprüfung, Fertigungskontrolle, Qualitätssicherung) an. Als duale Studiengänge im technischen Bereich werden Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik angeboten (www.hoppecke.com).
- Varta Microbattery (Ellwangen) bietet für die technische Ausbildung folgende Berufe (mit Beispielen für Tätigkeitsfelder) an: Industriemechaniker/in (Instandhaltung, Einstellung, Umrüstung, Inbetriebnahme von Fertigungsanlagen), Werkzeugmechaniker/in (Wartung, Instandhaltung, Inbetriebnahme von Werkzeugen), Maschinen- und Anlagenführer/in (Einrichtung, Umrüstung, Bedienung, War-

¹ Ausbildungsplätze werden von der Deutschen ACCUmotive im Produktionswerk in Kamenz bis einschließlich 2012 nicht angeboten. Im benachbarten, in der Produktionskette vorgelagerten Werk von Li-Tec wird für die Zellfertigung gewerblich-technische Ausbildung in den Berufsbildern Chemielaborant/in, Chemikant/in, Fachkraft für Lagerlogistik, Industriemechaniker/in, Mechatroniker/in, Physikalaborant/in angeboten.

tung), Elektroniker/in Automatisierungstechnik (Integration, Inbetriebnahme, Instandsetzung von Automatisierungslösungen). Zudem wird der Bachelor of Engineering im Wechsel zwischen Theorie an der Dualen Hochschule und Praxis im Unternehmen angeboten (www.varta-microbattery.com).

Zusammengefasst erfordern Traktionsbatterien im gesamten Produktionsprozess die Sicherstellung hoher, gleichbleibender Qualität. Wesentliche Kompetenzanforderungen beim Produktionsprozess des Batteriesystems (ab Packaging) sind Verbindungs- und Fügetechnik (Arbeiten unter Spannung), Qualitätssicherung, Prüfung und Tests (Elektrik, Dichtigkeit). Vollautomatisierte Montagelinien und vollautomatisierte Prüfeinrichtungen sind bei künftig höheren Stückzahlen zu erwarten.

7.5.2 Elektromotor

Für Elektromaschinen, die im elektrischen Antriebsstrang als Motor und Generator eingesetzt werden, kommen verschiedene Ausführungsformen in Betracht. Je nach Leistungsklasse und Anwendungsgebiet können im Automotive-Bereich Drehstrommotoren wie Synchronmaschinen, Asynchronmaschinen, Reluktanzmaschinen, aber auch Gleichstrommotoren eingesetzt werden (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2010). Das aufgrund eines hohen Wirkungsgrades und einer großen Leistungsdichte bei Automobilherstellern am häufigsten verwendete Aggregat ist der Synchronmotor, entweder in permanenterregter Ausführung (mit Magneten, für die Seltenerdmetalle benötigt werden) oder als fremderregter Synchronmotor. Über ähnlich gute Eigenschaften verfügt die Reluktanzmaschine. Der kostengünstigere Asynchronmotor spielt wegen des geringeren Wirkungsgrads im 80 %-Bereich und der niedrigeren Leistungsdichte bei Automobilherstellern bisher eher eine Nebenrolle. Auch die Gleichstrommaschine verfügt, im Vergleich zu Drehstrommotoren, über relativ schlechte technische Eigenschaften und kommt deshalb im Automotive-Bereich eher nicht zum Zuge.

Die hohen Qualitätsanforderungen der Automobil-OEM an die Antriebstechnik und damit auch an Elektromotoren sowie die Voll-Automatisierung der Elektromotoren-Fertigung sind die größten Herausforderungen für die Produktion und für deren Ausrüster. „Um die hohen Qualitätsanforderungen der Automobilindustrie zu erfüllen, müssen auch die Fertigungsprozesse anders ausgelegt werden. So kann z. B. durch den Schritt zur Vollautomatisierung auch für Motoren höherer Leistungsklassen die Reproduzierbarkeit hoher Produktqualität deutlich erhöht werden“ (Schlick, Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael, 2011, S. 29). Elektromotoren für den Fahrzeugantrieb werden in Deutschland derzeit z. B. von den Zulieferern Continental (in Gifhorn) und Bosch (in Hildesheim, u. a. für EMotive GmbH, das Gemeinschaftsunternehmen von Daimler und Bosch) gefertigt, aber auch in Kleinserie von Siemens (in Bad Neustadt) sowie von den OEM Volkswagen (in Kassel) und BMW (in Landshut).

Die Hauptkomponenten von Elektromotoren sind Rotor und Stator, ergänzt durch weitere Bauteile wie das Gehäuse und die Motorsteuerung. Der Kernprozess bei der Produktion von Elektromotoren ist das Wickeln der Drahtspulen; weitere wichtige Produktionsschritte sind das Stanzen bzw. Laserschneiden der Blechpakete, das Laminieren der Drahtspulen, die Fertigung des Gehäuses und die Endmontage des Elektromotors (Schlick, Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael, 2011, S. 27). Die Optimierung und weitere Automatisierung der Wickeltechnologie ist eine Aufgabe, die von den Entwicklern bei Elektromotorenherstellern und ihren Ausrüstern angegangen wird. Die Bedienung der weiterentwickelten Maschinen erfordert von den Beschäftigten in der Produktion entsprechende Kompe-

tenzen, z. B. vom fachgerechten Bedienen der Maschinen über das Umrüsten bis hin zu Wartung und Instandhaltung.

Der permanenterregte Synchronmotor wird im Forschungsprojekt ELAB näher betrachtet. Der Montageprozess eines Elektromotors kann in die drei wesentlichen Schritte Statormontage, Rotormontage, sowie deren „Hochzeit“ in der Endmontage unterteilt werden (Möbius F. , 2012). Diese drei Elemente der Montagelinie des Elektromotors sind auch im Fabriklayout entsprechend räumlich gebündelt (vgl. Kap. 4):

- Statormontage: Statorblechpaket erstellen – Wicklung einbringen – Wicklung verschalten und prüfen – Wicklung imprägnieren – Montage in Gehäuse – Montage Hochvolt-Anschluss – Test / Prüfen der Richtigkeit / Vollständigkeit.
- Rotormontage: Rotorblechpaket erstellen – Montage Rotorwelle und Blechpaket – Magnete positionieren und fixieren – Wuchten – Test / Prüfen geometrische und magnetische Kennwerte.
- Endmontage: mechanische Montage Rotor in Gehäuse – Integration Sensoren – Leistungsanschluss montieren – Gehäuse schließen – End-of-Line-Test mit Wirkungsgradmessung, Leistungsmessung, Dichtigkeitstest, Funktionstest, elektrischem Anschlussstest.

Heute sind einige der Montageschritte in diesen Prozessketten nur teilautomatisiert oder als manuelle Tätigkeit (z. B. Verschaltung der Wicklungen) ausgelegt (Fleischer, 2011, S. 40). So ist bei heutiger Kleinserienfertigung von Elektromotoren sorgfältiges Arbeiten und, bei einzelnen Schritten wie dem Einbringen der Wicklungen, eine hohe Fingerfertigkeit der Werker erforderlich (Kohnhäuser, 2011, S. 117). Bei künftiger Serienproduktion mit höheren Stückzahlen, wie in der Automobilindustrie üblich, ist dagegen beim Großteil der dargestellten Montageprozesse von einer hohen Automatisierung auszugehen. So gilt z. B. für verschiedene Schritte der Statormontage: „Adequate process reliability is only achieved using a fully automatic system“ (Möbius F. , 2012, S. 473). Die detaillierte Prozessbeschreibung zeigt, dass neben dem Einrichten, Bedienen, Überwachen und Warten einer solchen automatisierten Anlage als Aufgabe der direkten Produktionsbeschäftigten vor allem Kompetenzen wie Testen, Prüfen und Qualitätssicherung wichtig sind. Alles in allem ist für Automotive-Stückzahlen eine hochautomatisierte Herstellung von Elektromotoren mit starkem Robotereinsatz notwendig. Dazu werden dann mitarbeiterseitig vor allem Facharbeiter für die Instandhaltung und Qualitätssicherung sowie Maschinenbediener bzw. -führer benötigt (Exp.).

Demnach liegen die Anforderungen an die Beschäftigten in der Elektromotorenherstellung in erster Linie in konventionellen Montagekompetenzen, wie zwei betriebliche Fallstudien, generiert aus den Experteninterviews, zeigen:

- Fallbeispiel 1 – Automotive-Elektromotoren-Herstellung, auf 90.000 Synchronmotoren pro Jahr im Dreischichtbetrieb auf einer Fertigungslinie ausgelegt: In den direkten Fertigungs- und Montagebereichen werden anfangs – im Serienanlauf – vor allem Metall- und Elektro-Facharbeiter benötigt, z. B. „hinsichtlich Flexibilität und Engagement handverlesene Industriemechaniker und Elektriker“ (Exp.). In der „eingelaufenen“ Serienfertigung werden pro Schicht ca. 20 direkte Mitarbeiter eingesetzt. In den direkten Bereichen kann dann mit einem höheren Anteil von angelerntem Personal gearbeitet werden. Bei komplexeren Tätigkeiten, z. B. in der Wickelerei, werden Facharbeiter eingesetzt. Bei den produktionsnahen indirekten Mitarbeitern werden zur Instandhaltung und Qualitätssicherung Mechatroniker und weitere Metall- und Elektrofacharbeiter und Techniker benötigt, in einfachen Logistik-Tätigkeiten werden dagegen vor allem ungelernete Mitarbeiter eingesetzt. Als indirekte Mitarbeiter in Planung und Engineering werden je nach Art

der Aufgabe Industriemeister mit Metall- oder Elektroberufen, Techniker und Maschinenbauingenieure benötigt.

- Fallbeispiel 2 – Produktion Synchronmaschine: Für die Tätigkeiten Bestückung, Schraubprozesse und Montage werden angeleitete Werker benötigt. Dazu kommt ein Facharbeiter mit einem Metall-Beruf als Teamleiter, der direkt an einer Fertigungslinie mitarbeitet und bei Engpässen unterstützt. Für die Qualitätssicherung ist ein Auditor pro Fertigungslinie zuständig. Ein Meister übernimmt die Betreuung der Linien und Mechatroniker bzw. Schlosser als Instandhalter sind für technischen Support und Störungsbehebung zuständig. Im indirekten Bereich kommen Maschinenbau- bzw. Elektrotechnikingenieure als Fertigungsplaner, Prozessentwickler und Projektleiter hinzu.

Die Ausbildung in Produktionsstätten für Elektromotoren erfolgt in verschiedenen Berufsbildern, z. B. von den klassischen industriellen Elektronikerberufen über Industriemechaniker/in und Mechatroniker/in bis hin zu Maschinen- und Anlagenführer/in. Für die Kernkompetenz „Wickeln“ bei der Elektromaschinenherstellung gab es bis 1987 den Beruf Elektromaschinenwickler/in, der 1972, als der manuelle Anteil noch sehr hoch war, den Vorgängerberuf Elektrowickler/in abgelöst hat. Heutiges, deutlich höher automatisiertes Wickeln wird vor allem vom Berufsbild Elektroniker/in für Maschinen und Antriebstechnik abgedeckt, aber auch von Berufsbildern wie Elektroniker/in für Geräte und Systeme. Elektroniker für Maschinen und Antriebstechnik arbeiten hauptsächlich bei Herstellern von Elektromaschinen und Elektromotoren. Sie richten z. B. Fertigungsmaschinen für Ankerwicklungen von Elektromotoren ein, nehmen Maschinen- und Wickeldaten auf, stellen die benötigten Wicklungen her, führen Fehlerdiagnosen durch und nehmen die elektrischen Maschinen in Betrieb (<http://berufenet.arbeitsagentur.de>).

Bei einem der betrieblichen Fallbeispiele wird im Bereich Elektromotoren vor allem in den gewerblich-technischen Berufsbildern Elektroniker/in für Geräte und Systeme und Industriemechaniker/in (bei dem die Prozesskenntnis Wickeln innerbetrieblich vertieft wird) ausgebildet. Seit zwei Jahren werden hier keine Mechatroniker mehr ausgebildet, weil bei diesem Ausbildungsgang die „Vermittlung von Elektro-Kompetenzen nicht genügend in die Tiefe geht“ (Exp.), weshalb der Betrieb bedarfsorientiert auf den Elektronikerberuf umgestellt hat.

Bei einem anderen betrieblichen Beispiel, einem Komponentenwerk eines OEM, soll der Herausforderung Elektromobilität u. a. durch die Aufnahme einer Elektromotorenproduktion begegnet werden. Um dem Technologiewandel zu begegnen, wurde der „Aufbau transformativer Ressourcen“ als „wichtiger strategischer Stellhebel“ identifiziert (Stumpf, 2010). Durch den Aufbau neuer Kompetenzen soll vorhandene Prozesskompetenz in neuen Produkttechnologien zur Anwendung kommen. Als Beispiel explizit benannt werden das Gießen von Gehäusen für E-Antriebe (auf Basis des Gießens von Getriebe- und Kurbelgehäusen) und die Montage von E-Antrieben (auf Basis der vorhandenen Prozesskompetenz Getriebemontage). Wesentliche Elemente der vorgeschlagenen Transformationsstrategie sind:

- Aufbau transformativer Personalressourcen durch Qualifikation: Einsatz von Qualifizierungsmatrizen zur Weiterbildung der heutigen Belegschaft, Integration von Ausbildungsinhalten mit Bezug zum Elektromotorenbau in bestehende Ausbildungsberufe sowie verstärkte Ausbildung in elektrotechnischen Berufen.
- Aufbau transformativer Technologieressourcen durch Entwicklung und Fertigung von Prototypen: „Durch die frühzeitige Produkt- und Fertigungsprozessentwicklung der Elektrotraktion im Prototypenstadium erwirbt das Komponentenwerk technologische Kompetenzen, welche die gesamte Wertschöpfungskette abde-

cken. Die Erkenntnisse der Prototypenphase fließen in die Gestaltung der Serie ein“ (Stumpf, 2010).

- Aufbau transformativer Finanzressourcen durch Innovationsfonds: Ein unternehmensspezifischer Fonds zur Förderung von Innovationen unterstützt die Projektdurchführung.
- Aufbau transformativer Organisationsressourcen durch Kommunikation und neue Arbeitsformen: Kommunikation der Rolle des Werks im Technologiewandel ist für das Selbstverständnis der Beschäftigten und die Wahrnehmung des Standorts durch die Stakeholder von zentraler Bedeutung. Gleichzeitig nimmt die Arbeit in Netzwerken und in Projekten eine immer größere Rolle ein.

Inzwischen ist die Prototypenproduktion von Traktionselektromotoren am Werksstandort aufgebaut und im Rahmen von Auswahlprozessen des make-or-buy-committees konnte die 2012 anlaufende Serienfertigung von zwei Produkten gesichert werden (Exp.).

7.5.3 Leistungselektronik

Rein elektrische Antriebskonzepte wie auch Hybrid-Antriebskonzepte benötigen Leistungselektronik für die Ansteuerung des elektrischen Traktionsmotors. Als Leistungselektronik wird die Umformung und Steuerung elektrischer Energie mittels elektronischer Bauelemente bezeichnet. In den entsprechenden Steuergeräten wird elektrische Energie auf die für den elektrischen Antriebsmotor passende Spannung und Frequenz umgewandelt. Die Herausforderung besteht darin, diese Komponente mit geringer Verlustleistung, geringem Gewicht und in kleiner Baugröße zu bauen.

Leistungselektronik besteht im Wesentlichen aus folgenden Baugruppen (Gröter, Lichtermann, & Stützle, 2011):

- Invertermodul als Wechselrichter-Leistungsteil mit Zwischenkreiskondensator und Leistungsschalter-Modulen.
- DC/DC-Konverter-Modul, das der 12V-Bordnetz-Versorgung aus dem Hochvolt-Traktionsbordnetz dient.
- Schaltungsmodul der Steuerung.
- Software.

Für die Montage von Leistungselektronik werden in der Regel die standardisierten elektronischen Bauteile wie Kondensatoren, Widerstände etc. als Commodities zugekauft. Sofern die Chips nicht zugekauft werden, erfolgt eine spezialisierte Chipfertigung inhouse – wie z. B. beim Bosch-Leitwerk für Leistungselektronik in Reutlingen in der eigenen „Wafer-Fab“.

Die Anforderungen an die Montage liegen zum einen im Bereich der Bauelemente-Bestückung, zum anderen werden Molding-Prozesse als spezifische Herausforderung hervorgehoben, weil in den Steuergeräten feinste Strukturen mit hohen Strömen kombiniert und vergossen werden. In den verschiedenen Montageschritten werden zahlreiche angelernte Mitarbeiter (z. B. „Operator“ als Bestücker) eingesetzt, dazu kommen Facharbeiter mit Elektronik- oder Mechatronik-Ausbildung (die z. B. hoch- und vollautomatisierte Anlagen überwachen und instandhalten oder in den Bereichen Prüfen, Testen, Qualitätssicherung eingesetzt werden).

Bei der Definition von Kompetenzanforderungen und entsprechenden Qualifizierungskonzepten gibt es eine Diskrepanz zwischen Entwicklungsbereichen und Fertigungsbereichen: Für die Entwicklung von Leistungselektronik für Hybrid- und Elektrofahrzeuge sind bei den höheren Qualifikationsstufen sowohl bei OEM als auch bei

Komponentenherstellern neue Kompetenzanforderungen klar definiert und sie fließen in entsprechende Qualifikationsmaßnahmen ein. Ein Beispiel im Großraum Stuttgart ist das Robert Bosch Zentrum für Leistungselektronik, das 2009 an den Standorten Reutlingen und Stuttgart von der Hochschule Reutlingen, der Universität Stuttgart und der Robert Bosch GmbH gegründet wurde. Der Verbund Leistungselektronik umfasst sieben Lehrstühle, von denen fünf neu eingerichtet wurden. Die enge Kooperation der Hochschulen mit Bosch ermöglicht eine industriennahe Ausbildung in Studiengängen mit den Schwerpunkten Leistungs- und Mikroelektronik. Neben einem Stipendienprogramm für ausgewählte Studierende besteht zur Finanzierung des Studiums das Angebot von Bosch als Werkstudent/-in tätig zu sein.

Neue Kompetenzanforderungen für die Produktion von Leistungselektronik für mittlere Qualifikationen und für Angelernten-Tätigkeiten sind dagegen bisher kaum definiert. Spezifische Schulungsbedarfe für Techniker, Facharbeiter und Maschinenbediener müssen zum gegenwärtigen Stand erst noch ermittelt werden, hier gilt es neue Kompetenzanforderungen durch Entwickler zu definieren und dafür Schnittstellen zwischen Entwicklung, Personalabteilung und Betriebsrat zu schaffen (Exp.). Als Maschinenbediener und Bestücker („Operator“) werden häufig angelernte Mitarbeiter eingesetzt. Diese sind nach den bisherigen Erfahrungen bei der Produktion von Leistungselektronik für Automotive-Anwendungen zwar weniger mit neuen technischen Anforderungen konfrontiert. Sie müssen sich aber neuen ergonomischen Anforderungen stellen, bedingt durch das relativ hohe Gewicht von Automotive-Hochvolt-Steuergeräten.

Bei einem der betrieblichen Fallbeispiele, in dem u. a. Automotive-Leistungselektronik gefertigt wird, werden im gewerblich-technischen Bereich die Berufe Mechatroniker/in, Elektroniker/in für Geräte und Systeme, Mikrotechnologe/in und Industriemechaniker/in als Ausbildungsgänge angeboten, wobei der Fokus klar bei den erstgenannten liegt.

Exkurs: Montagearbeit im Bereich der Leistungselektronik – das Beispiel Semikron

Am Beispiel der Montagearbeit im Bereich der Leistungselektronik wurde vor einigen Jahren die „Qualifizierung für die Montage von morgen“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009) untersucht; eingebettet in das Projekt „Wettbewerbsfähige Produktionskonzepte und Montageverfahren für leistungselektronische Systeme in globalen Märkten“ (Feldmann, 2009), das im Rahmen der BMBF-Förderlinie „Forschung für die Produktion von morgen“ im Themenfeld „Kompetenz Montage“ durchgeführt wurde.

Eine Fallstudie bei Semikron in Nürnberg, einem führenden Hersteller von Hightech Leistungshalbleitern, kam zum Ergebnis, dass insbesondere in den Fertigungsbereichen die Aus- und Weiterbildung immer wichtiger wird. „Komplexe Arbeitsabläufe und Prozesse sowie ein zunehmender Automatisierungsgrad erfordern eigenverantwortliche Prozessbeherrschung, Flexibilität und fundiertes Fachwissen der Mitarbeiter“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009, S. 248). Der Fallstudien-Betrieb Semikron entschloss sich deshalb dazu, Montagebeschäftigten ohne bzw. mit fachfremdem Berufsabschluss eine Ausbildung zum Maschinen- und Anlagenführer mit anschließender Zusatzqualifizierung zur Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten anzubieten.

Semikron verfolgt damit mehrere Ziele: „Mitarbeiter sollen dahingehend ausgebildet werden, neue Technologien und technische Innovationen besser und schneller bewältigen zu können und den steigenden Anforderungen an Produktqualität und Produktivität noch mehr gerecht zu werden. Außerdem wird eine höhere Flexibilität angestrebt, so dass beispielsweise Einsätze in anderen Produktionsbereichen oder auch an anderen Anlagen ohne lange Einarbeitungszeit möglich werden“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009, S. 249). Vorteile für die Auszubildenden liegen darin, dass sie ihre Chancen auf dem internen sowie externen Arbeitsmarkt deutlich erhöhen und ihnen klare und transparente Perspektiven für berufliche Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Laut „Berufenet-Steckbrief“ der Bundesagentur für Arbeit sind Maschinen- und Anlagenführer/innen für die Einrichtung, Umrüstung und Bedienung von Maschinen und Anlagen zuständig. Dabei bereiten sie Arbeitsabläufe vor, überprüfen Maschinenfunktionen und nehmen Maschinen in Betrieb. Ferner überwachen sie den Produktionsprozess und bedienen und steuern den Materialfluss. Die entsprechend ausgebildeten Fachkräfte sind damit für flexible und komplexer werdende Montage-tätigkeiten besser qualifiziert. Das nicht im Berufsbild enthaltene Modul „Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten“ wurde in das Qualifizierungskonzept zusätzlich aufgenommen, weil entsprechende Elektrokenntnisse „für die beruflichen Tätigkeiten bei Semikron sinnvoll sind“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009, S. 252).

Im Resümee zeigt die Entwicklung und Umsetzung der Qualifizierungsmaßnahme bei Semikron „eindrücklich, dass auch Un- und Angelernte jene oftmals unterstellten Schwellen zu formalisierter Weiterbildung überschreiten ..., wenn die entsprechenden Anreize (Aufgabenvielfalt, Partizipationschancen, berufliche Entwicklungsmöglichkeiten, Kommunikationschancen) in der Arbeit gegeben sind“ (Hörner, Holm, & Pirner, 2009, S. 270).

7.5.4 Brennstoffzellensystem

Beim Brennstoffzellenfahrzeug werden zusätzlich zu den betrachteten Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs das Brennstoffzellensystem und der Wasserstofftank als weitere wesentliche Komponenten benötigt.

Herzstück des Brennstoffzellensystems ist der Stack, ein Stapel von einigen Hundert einzelnen Brennstoffzellen, der in einem spritzwassergeschützten Gehäuse verpackt ist. Neben dem Brennstoffzellensystem steht bei der folgenden Betrachtung der Wasserstofftank im Zentrum. Die Produktion von Brennstoffzellensystemen für den Automotive-Bereich und von Wasserstofftanks erfolgt bisher in überschaubaren Stückzahlen und mit entsprechend geringer Automatisierung. Die Abläufe in der Montage sollen jedoch vom handwerklichen Prototypenbau auf industrielle Verfahren und Prozesse umgestellt werden (Thomas, 2010). Entsprechend ist die Fertigung in industriellem Maßstab derzeit im Aufbau, den Start der Serienproduktion hat z. B. Daimler für 2013 angekündigt.

Die einzelnen Komponenten eines Brennstoffzellenantriebs werden bisher in der Regel jeweils von einem Lieferanten entwickelt, getestet und bereitgestellt. „Die Aufgabe des Fahrzeugherstellers besteht in der Integration aller Komponenten in das Fahrzeug und die Entwicklung der Steuerungselektronik, die dem Fahrzeug die herstellereigenschaftenspezifischen Eigenschaften verleiht“ (BzA-BW & WRS, 2009, S. 14). Die Stack-Montage, also der Zusammenbau von Bauteilen wie Bipolarplatten und Membran-Elektroden-Einheiten, „obliegt dem Systemlieferanten, der die Verantwortung für die Funktion und Qualität des Stacks trägt“ (BzA-BW & WRS, 2009, S. 21). Die Stack-Montage könnte aber auch in der Aggregateproduktion eines OEM stattfinden. Die Frage ob OEM oder Systemlieferant ist noch offen. Die Studie „Brennstoffzelle in der Region Stuttgart – Analyse und Ausbau der Wertschöpfungsketten“ kommt für die Stack-Herstellung zum Resümee, dass in der Region alle Kompetenzen vorhanden sind und sieht Handlungsbedarf darin, interessierte Unternehmen zu einem Projekt „Baden-Württemberg-Stack“ zusammenzuführen mit dem Ziel, eine Stackproduktion in Baden-Württemberg zu etablieren (BzA-BW & WRS, 2009, S. 22).

Die Fertigung von Brennstoffzellenstacks ist mit einem starken Wandel der klassischen Produktionstechnologien im Bereich Antriebsstrang verbunden. Für die Antriebsstrangproduktion neue Prozesse wie „Dünnschicht-Schnittprozesse, Formpressen, Dünnschicht-Verarbeitung, Laminierprozesse, elektrochemische Beschichtung“ müssen bei der Fertigung bis zum Stack beherrscht werden (Steegmüller, 2011, S. 29). Neben den technischen Kompetenzen werden von den Beschäftigten insbesondere „Zuverlässigkeit, Sorgfalt und Umsicht“ in der Bearbeitung gefordert (Exp.). Im Produktionsprozess erfährt die Qualitätssicherung einen hohen Stellenwert, gleichzeitig sind die Reinheitsanforderungen sehr hoch: „Wenn nur eine Bipolarplatte verunreinigt und defekt ist, wird das ganze Stack zum Ausschuss“ (Exp.). Die Kompetenzanforderung „Umgang mit Hochvolt-Systemen“ ist in den Produktionsprozessen der Bauteile noch nicht gefragt. Die Brennstoffzellensysteme stehen erst ab Inbetriebnahme unter Strom, so dass die Fachkräfte ab diesem Produktionsschritt entsprechend geschult sein müssen. Bei den Qualifizierungskonzepten des Weiterbildungszentrums Brennstoffzelle Ulm (WBZU) steht entsprechend „theoretisches und praktisches Fachwissen über den sachgemäßen und sicheren Umgang mit Wasserstoff und Brennstoffzellen“ im Zentrum. Es werden sowohl elektrochemische Grundlagen und thermodynamische Zusammenhänge vermittelt als auch das Betriebsverhalten und Sicherheitsanforderungen an Testständen aufgezeigt (Exp.).

Bereits Anfang der 2000er Jahre wurden „relevante Qualifikationen für Brennstoffzellen-Produktion“ bei einem Expertenworkshop im Hause Daimler ermittelt. Im

Ergebnis wurde ein dringender Bedarf für die Konzeptionierung von Aus- und Weiterbildungsangeboten gesehen, „damit eine Qualifizierungslücke vermieden werden kann“ (Schmidt, Pack, Schaezle, & Staudacher, 2002, S. 17). Als relevant eingestuft wurde u.a.:

- Verantwortungsvolle Grundhaltung bezüglich Qualität und neuer Technik
- Hochvolt-Technik – Grundkenntnisse und Zusammenhänge, Ursache-Wirkungsketten, Gefahren, Elektrofachkraft für festgelegte Tätigkeiten
- Elektrochemische Grundlagen, Arbeiten an Energiespeichern
- Grundlagen Druckgasanlagen, Verschraubungstechnik an Hochdruckanlagen, Prüfvorgänge bei Gasundichtheit, Explosionsschutz, Brandschutz
- Kühlung und Kühlsysteme
- Materialkenntnisse
- Sicherheitsvorkehrungen und Sensorik

Bis heute wurden in Werksbereichen, in denen Brennstoffzellen montiert oder verbaut werden, verschiedene brennstoffzellenspezifische Qualifizierungsmodule implementiert. Entsprechende Erfahrungen liegen für die Pkw-Montage vor. Bisher erfolgt die Montage von Brennstoffzellenautos in kleinen Stückzahlen unter Manufakturbedingungen. Für die Mitarbeiter in einer solchen manuell geprägten Pkw-Montage gibt es eine „Sicherheitsunterweisung Hochvolt und Brennstoffzelle“ und eine „Sicherheitsunterweisung für Druckbehälter“. Für die Beschäftigten in der Inbetriebnahme, Prüfung und Nacharbeit ist eine Weiterbildung zur „H2-Fachkraft“ implementiert. Für die Pkw-Montage gilt, dass „ein Mitarbeiter, der heutige Fahrzeuge zusammenbaut, auch ein Brennstoffzellenauto zusammenbauen kann“ (Exp.). „In der Linie gibt es keine prinzipiell neuen Anforderungen an Montagemitarbeiter, das ist alles handhabbar wie bei konventionellen Fahrzeugen. Aber am Linienende, ab der Inbetriebnahme sind dann höherqualifizierte E-Spezialisten erforderlich“ (Exp.).

Spezifische Kenntnisse sind beim aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) produzierten Wasserstofftank erforderlich. Synergien zu modernen CFK-Leichtbau-Technologien in anderen Automotive-Bereichen, z. B. dem Karosserieleichtbau, sind hier absehbar. Als Ausbildungsberuf in diesem Bereich gewinnt das Berufsbild „Verfahrensmechaniker/in – Kunststoff- und Kautschuktechnik“, in dem Faserverbundwerkstoffe intensiv behandelt werden, an Bedeutung (Exp.).

7.6 Bildungsinfrastruktur in der Standortumgebung

Neben den unmittelbaren Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs für eine idealtypische Aggregateproduktion wird im Forschungsprojekt ELAB auch die „Standortumgebung“ betrachtet. Die Standortumgebung wird hier von zwei Seiten betrachtet:

- Was bedeutet der Technologiewandel zur Elektromobilität für die Standortumgebung?
- Welche Rolle spielt die Standortumgebung für den Technologiewandel?

Für die qualitative Analyse im Bereich „Kompetenzanforderungen und Qualifikationen“ sind, aus diesen übergeordneten Fragestellungen abgeleitet, zwei Fragen im Kontext „Standortumgebung“ relevant. Zum einen im Sinne einer „Bedarfsanalyse Standortumgebung“ die Frage, wie Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel durch eine Verbesserung von Standortfaktoren (wie z. B. Bildungsinfrastruktur) unterstützen können. Zum anderen im Sinne einer „Kontextanalyse Standortumgebung“ die übergreifende Fragestellung nach der zukünftigen Lage am

Arbeitsmarkt und Fachkräfteengpässen in Folge des demographischen Wandels, die im folgenden Teilkapitel behandelt wird.

Standortfaktoren wie Bildungsinfrastruktur, Arbeitsmarktbedingungen, Flächenverfügbarkeit, FuE-Infrastruktur (Hochschulen, Forschungsinstitute), Innovationsbedingungen (Wissenstransfer-Einrichtungen), Technologieförderung und Netzwerke (Unternehmen, Betriebsräte, regionale Akteure, etc.) sind bedeutende Elemente der wirtschaftsbezogenen Standortumgebung. Ein spezifisch für den Technologiewandel zur Elektromobilität zusätzlich wichtiger Faktor für die Standortumgebung ist der Aufbau einer geeigneten Lade- bzw. Wasserstoffinfrastruktur: „Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bedingt die Entwicklung und den Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur. ... Der Aufbau einer durchgängigen Lade- sowie Wasserstoffinfrastruktur ist essenziell. Die Technologie wird sich zuerst ausbreiten und durchsetzen, wo auch die Infrastruktur vorhanden ist“ (Spath, et al., 2011, S. 69).

7.6.1 Vorbemerkung zum Begriff „Standortumgebung“

Unternehmenserfolg hängt nicht nur von unternehmensbezogenen Faktoren und betrieblicher Effizienz ab; auch der regionale Kontext, das Unternehmensumfeld spielt eine zentrale Rolle (Porter, 2008). Der ELAB-Untersuchungsgegenstand „Standortumgebung“ umfasst die für eine Antriebsstrangproduktion relevanten Umfeldbedingungen mit Fokus auf die Region, die als Arbeitsmarkt- oder Wirtschaftsraum gekennzeichnet ist. Ein „regionales Innovationssystem“ bzw. ein „Automotive-Cluster“¹, wie es in Baden-Württemberg vorliegt, könnte beispielsweise eine solche „Standortumgebung“ räumlich fassen. Bestandteile der Standortumgebung sind damit zum einen Unternehmen und ihre Beschäftigten, hier vor allem die Zulieferer rund um die Antriebsstrangproduktion, zum anderen Institutionen, die die Umfeldbedingungen der Standortumgebung beeinflussen und gestalten. Standortfaktoren wie Bildungsinfrastruktur, Arbeitsmarktbedingungen, Flächenverfügbarkeit, Forschungsinfrastruktur, Innovationsbedingungen, Netzwerke charakterisieren die Umfeldbedingungen der Standortumgebung. Gestaltungsmöglichkeiten für diese Umfeldbedingungen werden von verschiedenen Akteuren in Stadt und Region wahrgenommen. Das Spektrum von solchen „wirtschaftsfördernden Akteuren im Bereich Elektromobilität“ (Esch, 2011) setzt sich aus Akteursgruppen wie Wirtschaftsförderungseinrichtungen der öffentlichen Hand (kommunal und regional), Netzwerkorganisationen, Ausbildungseinrichtungen, Forschungseinrichtungen und Interessenverbänden zusammen.

Auf Politik und Wirtschaftsförderung bezogen sind mit der „Standortumgebung“ verschiedene räumliche Ebenen adressiert, in Deutschland geht das Spektrum von der Region über das Bundesland bis hin zum Bund. Es gibt bei diesen Ebenen viel-

¹ Ein Cluster wird als räumliche Konzentration von in einer Wertschöpfungskette miteinander verbundenen Unternehmen (vom Endhersteller über spezialisierte Zulieferer bis hin zu Dienstleistungsunternehmen) und zugehörigen unterstützenden Institutionen (von der Forschung bis zur Wirtschaftsförderung) definiert. Das Verhältnis zwischen den Clusterakteuren ist durch Kooperation und Konkurrenz („Coopetition“) gekennzeichnet. Vorteile von Clustern für die Regionalwirtschaft liegen im Angebot eines spezialisierten Arbeitskräftepotenzials, in der Konzentration von Zulieferern und Dienstleistungsunternehmen sowie in guten Bedingungen für den Wissenstransfer. Erst die Vernetzung von Unternehmen, Forschungseinrichtungen und regionalen Akteuren entlang von Wertschöpfungsketten nutzt Synergien zwischen den Beteiligten besonders gut. Regionale Cluster mit einer hohen Vielfalt, starken Ausprägung und enger Vernetzung weisen standortbegünstigende Wettbewerbsvorteile auf und sie bewirken in der Regel positive Arbeitsmarkteffekte.

fach keine trennscharfen Abgrenzungen bei Zuständigkeiten, so können z. B. wirtschaftspolitische Impulse von allen Ebenen gesetzt werden. Die folgenden Beispiele sollen Hinweise für Zuständigkeiten geben:

- Die Ebene Region ist für Regionalplanung und regionale Wirtschaftsförderung zuständig. In der Region Stuttgart¹ werden beispielsweise von Regionalpolitik und Wirtschaftsförderung verschiedene Aktivitäten für Unternehmen, für Gründer und für Investoren angeboten: Clusterförderung („CARS“ – „Clusterinitiative Automotive Region Stuttgart“), Ansiedlungsbetreuung (z. B. Portal für Gewerbeimmobilien), Fachkräftesicherung (mit Services in den Themenfeldern Mitarbeiterbindung, Qualifizierung, Rekrutierung), Innovationsförderung und Netzwerke (z. B. Regionale Kompetenz- und Innovationszentren in verschiedenen Branchen- und Technologiefeldern). Gemeinsam mit E-mobil-BW koordiniert die WRS das baden-württembergische Schaufenster Elektromobilität „LivingLab BW^e mobil“ (s. u.).
- Die Ebene Bundesland ist für die Politikbereiche Bildung, Arbeitsmarkt, Wirtschaft, Forschung etc. zuständig, oftmals im Zusammenspiel mit der Bundesebene, die z. B. für ein einheitliches System der Aus- und Fortbildung zuständig ist (Berufsbildungsgesetz und Ausbildungsordnungen). In Baden-Württemberg² hat beispielsweise die Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie „E-mobil-BW GmbH“ (als von der Landesregierung gegründete zentrale Beratungs- und Servicestelle) Aufgaben inne wie Vernetzung, Wissenstransfer, Innovationsförderung, Bildungsausbau, Standortmarketing, Imagepflege. E-mobil-BW koordiniert zwei bedeutsame Initiativen: (1) den „Cluster Elektromobilität Süd-West“, der erfolgreich am Spitzencluster-Wettbewerb des BMBF teilgenommen hat und mit 40 Mio. Euro für Forschungsprojekte gefördert wird und (2) „LivingLab BW^e mobil“, das am Wettbewerb „Schaufenster Elektromobilität“ der Bundesregierung erfolgreich teilgenommen hat mit einem Projektvolumen von insgesamt gut 150 Mio. Euro.

Die Betrachtung der Standortumgebung ist in drei inhaltliche Schwerpunkte gegliedert, die auch von den im Rahmen von ELAB befragten Experten in den Vordergrund gerückt wurden: Beim Branchenumfeld, bei der Zuliefererstruktur, werden insbesondere Wirkungen der Elektrifizierung auf die kleinen und mittleren Unternehmen betrachtet, also auf die KMU-Zulieferer (Kap. 8). Aus dem Bereich der Standortfaktoren ist – auf den technologischen Wandel bezogen – die Bildungsinfrastruktur hervorzuheben. Anschließend wird die Thematik „Arbeitsmarkt und demographischer Wandel“ mit Blick auf das zukünftige Erwerbspersonenpotenzial diskutiert.

7.6.2 Bedarfsanalyse Bildungsinfrastruktur

Die Bildungsinfrastruktur – insbesondere auf den Produktionsstandort bezogen – stand beim Forschungsprojekt ELAB im Zentrum und wird im Folgenden im Sinne

¹ Für die Region Stuttgart wurde unter der Überschrift „Umbruch in der Automobilregion“ bereits 2009 eine erste Wirkungsabschätzung des Technologiewandels zur Elektromobilität auf den Automotive-Cluster Region Stuttgart im Rahmen des Strukturberichts Region Stuttgart 2009 veröffentlicht (Dispan, et al., 2009).

² Eine Analyse von „Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität“ legte Fraunhofer IAO im Rahmen der Strukturstudie BWe Mobil 2011 vor (Spath, et al., Strukturstudie BWe mobil 2011, 2011). „Wirkungen der Elektromobilität auf regionale Wertschöpfungsketten und auf Beschäftigung in Baden-Württemberg“ untersuchten IMU Institut und FAST für die IG Metall (Dispan & Meißner, 2010).

einer Bedarfsanalyse vertieft.¹ Ein Ausgangspunkt für diese Schwerpunktsetzung ist die Erkenntnis, dass nicht rechtzeitig oder nicht in der richtigen Qualität zur Verfügung stehende Kompetenzen der Beschäftigten das Ausschöpfen von Potenzialen aus der Einführung neuer Technologien behindern kann und dass hier auch Aufgabenfelder regionaler Akteure liegen: „Eine ‚Synchronisation‘ der Personalentwicklungsaktivitäten mit denen der Technologie-Planung ist daher angezeigt. Allerdings kann diese Aufgabe nicht nur alleine in der Verantwortung der Betriebe liegen, sondern muss von den regionalen und überbetrieblichen Akteuren durch die Bereitstellung entsprechender und regionaler Qualifizierungsmöglichkeiten sowie -potenziale (an Fachkräften) unterstützt werden. Idealerweise wird regionale, zukunftsorientierte Technikfolgenabschätzung in relevanten Technik- oder Anwendungsfeldern wie bspw. ... der Elektromobilität auf zukünftige Qualifikationsbedarfe heruntergebrochen. Darauf basierend könnten die regionalen Träger der Aus- und Weiterbildung gezielt Strategien entwickeln, wie diese Bedarfe durch geeignete Bildungs- und Qualifizierungsangebote gedeckt werden könnten. Ein solches Vorgehen erfordert ein frühzeitiges Einbinden der regionalen Unternehmen – z. B. im Rahmen der ... unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit“ (Kleine, Kinkel, Som, Bräunlich, & Kräusel, 2010, S. 85).

In diesem Sinne lassen sich aus den Ergebnissen der Wirkungsanalyse „Kompetenzanforderungen und Qualifikationen“ mehrere spezifisch auf die Bildungsinfrastruktur bezogene Anforderungen ableiten. Demnach sollten in der Standortumgebung gute Voraussetzungen geschaffen werden, indem z. B. neue, elektromobilitäts-spezifische Qualifikationsinhalte in die berufliche Bildung integriert werden. Von befragten Experten hervorgehoben wurde auch, dass Bildungseinrichtungen gerade in Automotive-Regionen vielfach stark auf den klassischen Metall- und Mechanik-Bereich orientiert sind. „Es ist an der Zeit, dass sich die überbetrieblichen Bildungstätten für die Metallindustrie viel stärker in Richtung elektrotechnische Erfordernisse öffnen und die Vermittlung entsprechender Kompetenzen in ihr Angebot aufnehmen“ (Exp.). Im dualen Ausbildungssystem sollten neben den Betrieben auch die Berufsschulen neue Inhalte wie den Umgang mit Hochvolt-Systemen integrieren, wie z. B. in der Region Stuttgart mit der „Zusatzqualifikation Fachkraft für elektrotechnische Arbeiten an Hochvolt-Systemen“ implementiert. Im Bereich der Weiterbildung sind koordinierte Angebote und eine Standardisierung von Qualifizierungsinhalten und -abschlüssen erforderlich. Um die Bildungsinfrastruktur auf den Technologiewandel auszurichten ist es wichtig – so auch ein Ergebnis der Nationalen Plattform Elektromobilität – ein Netzwerk aller Akteure der beruflichen und akademischen Bildung zu bilden und so abgestimmte Konzepte hinsichtlich zukünftiger Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie eine koordinierte, transparente Umsetzung zu erreichen.

Beim Wettbewerb „Schaufenster Elektromobilität“, an dem sich Ende 2011 Regionen aus Deutschland beteiligen konnten, war als ein inhaltlicher Schwerpunkt ein „strategischer Beitrag zu Ausbildung und Qualifizierung“ gefordert (Bundesanzeiger, 2011). Im April 2012 wurde bekanntgegeben, dass im Rahmen des bundesweiten Programms „Schaufenster Elektromobilität“ die vier Regionen Baden-Württemberg, Berlin/Brandenburg, Niedersachsen und Bayern/Sachsen gefördert werden. Baden-Württemberg bekam von der Bundesregierung im Wettbe-

¹ Auf weitere strukturelle Standortbedingungen geht die Strukturstudie BW^e-mobil (Spath, et al., Strukturstudie BWe mobil 2011, 2011) ein, z. B.: Förderbedingungen im systemischen Ansatz (S. 44), Forschungsinfrastruktur (S. 45), Aufbau Lade-/Wasserstoffinfrastruktur (S. 69), Netzwerke und Cluster (S. 71).

werb von 23 Regionen den Zuschlag für das Konzept „LivingLab BW^e mobil“ (E-mobil-BW & WRS, 2012). Ziel des Schaufensters „LivingLab BW^e mobil“ ist es, Elektromobilität erfahrbar zu machen und vor Ort sichtbare Pilot- und Demonstrationsprojekte für nachhaltige Mobilität zu initiieren und umzusetzen. Die Bedeutung für die Standortumgebung liegt auf der Hand: Bürgerinnen und Bürger sollen von Elektromobilität als nachhaltiger Mobilität auf Basis regenerativer Energien begeistert werden und Baden-Württemberg soll eine zentrale Rolle auf dem Weg Deutschlands zum Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität spielen. Die Thematik „Ausbildung und Qualifizierung“ ist einer von neun Konzeptbausteinen. Verschiedene Bildungsprojekte richten sich an alle Alters- und Qualifikationsstufen. Die zwei praxisorientierten Projekte „Regionale Bildungsplattform“ und „Genius – Elektromobilität in der Schule“ haben zum Ziel, Kinder und Jugendliche für nachhaltige (Elektro-)mobilität zu begeistern. Durch ein „mobiles Schulungszentrum“ und eine „Schauwerkstatt und Bildungs-Roadshow“ sollen gewerbliche Beschäftigte und Handwerksunternehmen kompetent über das Thema informiert werden. Eine „e-Fahrschule“ spricht die „zukünftige mobile Generation an“ (E-mobil-BW & WRS, 2012, S. 11). Mit diesen Bausteinen soll gewährleistet werden, dass die Sensibilisierung für die neuen Technologiethemen rund um Elektromobilität und entsprechendes Transformationswissen nicht nur Auszubildende und Beschäftigte erreicht, sondern in die Breite der Gesamtbevölkerung aller Altersstufen getragen wird. „Die Sensibilisierung der breiten Masse für Elektromobilität und nachhaltige Mobilität insgesamt ist absolut notwendig. Wir sollten mit dem Thema alle Altersstufen, angefangen beim vorschulischen Bereich, erreichen“ (Exp.).

Die Landesregierung Baden-Württemberg sieht einen wesentlichen Standortfaktor des Autolandes Baden-Württemberg im Aus- und Weiterbildungsangebot. „Die Sicherung der Nachwuchskräfte und die Absicherung des Fachkräftebedarfs sowie die kontinuierliche Weiterbildung der Kompetenzen von Beschäftigten in den neuen Technologiefeldern der Elektromobilität (einschließlich Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie) sind erfolgsentscheidende Faktoren für die weltweite Innovationsführerschaft des Standortes. Bildungsinitiativen sind in der akademischen Ausbildung, dem gewerblichen Bereich, z. B. in den Werkstätten und Servicebetrieben, aber auch im kaufmännischen Umfeld notwendig“ (Landtag von Baden-Württemberg, 2011, S. 2). Eine entsprechende Bildungsinitiative wurde bereits implementiert: Berufliche Weiterbildung im Bereich Elektromobilität wird seit Anfang 2012 vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg im Rahmen des Europäischen Sozialfonds gefördert. Mit dem Förderschwerpunkt sollen zusätzliche Anreize geschaffen werden, damit sich Beschäftigte in den Branchen, in denen die Elektromobilität in Zukunft eine Rolle spielen wird, weiterbilden können. Die Förderung beträgt 50 % der Gebühren für Kurse, die sich auf elektrifizierte Antriebsstränge beziehen, wie z. B. Batterietechnologie, Leistungselektronik, Brennstoffzellentechnik, Regelungs- und Steuertechnik, elektrische Fahrzeugantriebe (www.esf-bw.de).

Die Entwicklung langfristiger Perspektiven und Strategien für regionale Arbeitsmärkte und Qualifizierungssysteme könnte ein regionales Arbeitsmarktmanagement leisten (Conrads, 2004). Regionales Arbeitsmarktmanagement ist ein Gestaltungs- und Steuerungsinstrument der Arbeitsmarktentwicklung in einer Region mittels bildungs- und beschäftigungspolitischer Maßnahmen (Annawald, 2005). Mittels eines ressortübergreifenden Vorgehens bündelt und koordiniert ein Netzwerk regionaler Akteure rund um den „Arbeitsmarkt“ die arbeitsmarktbezogenen Betätigungsfelder in einer Region. Ziel ist es, zwischen den Bereichen der Wirtschaftsförderung, Regionalentwicklung, Struktur- und Bildungspolitik zu vermitteln, neue Entwicklungslinien und Zukunftspotenziale frühzeitig zu ermitteln, und damit zu regionalen Anpassungs- und Transformationsprozessen – im Sinne des Struktur- und Technologiewandels – beizutragen.

7.7 Arbeitsmarkt und demographischer Wandel

Großen Einfluss auf die zukünftige Arbeitswelt in der Automobilindustrie – ob mit oder ohne elektrifizierte Antriebsstränge – wird der demographische Wandel ausüben. Zum einen durch das wachsende Gewicht von Hochschulabsolventen auf dem Arbeitsmarkt und im Beschäftigungssystem („Akademisierung“), zum anderen durch alternde Belegschaften und das insgesamt rückläufige Arbeitskräfteangebot in den nächsten Jahren und Jahrzehnten. Diese wichtigen Determinanten der Arbeitswelt der Zukunft werden im Folgenden diskutiert.

Die Akademisierung der Arbeitswelt ist ein seit langem anhaltender, sich weiter fortsetzender Prozess. Darunter wird das wachsende Gewicht von Hochschulabsolventen auf dem Arbeitsmarkt und im Beschäftigungssystem verstanden. Damit ist nicht nur der steigende Akademikeranteil an Beschäftigten gemeint, sondern auch die wachsende Bedeutung von Hochschulabschlüssen und veränderte Maßstäbe der beteiligten Akteure: „Wenn z. B. Anfang der 1960er Jahre deutlich unter 10 %, 1995 bereits mehr als ein Viertel (27 %) und mittlerweile rund die Hälfte der jungen Frauen und Männer in den entsprechenden Jahrgängen ein Studium aufnehmen, dann verändern sich auch die gesellschaftlichen (und möglicherweise auch die betrieblichen) Maßstäbe für ‚talentierte‘ Bewerber und für ‚erfolgreiche‘ Bildungskarrieren. Es verändern sich Rekrutierungs- und Auswahlmöglichkeiten der Betriebe, Karrierewege in Betrieben, die Muster betrieblicher Arbeitsteilung usw.“ (Kuda, Strauß, Spöttl, & Kaßbaum, 2012, S. 12). Akademisierung bezeichnet demnach im speziellen auch die Substitution von Facharbeitern durch Akademiker, d. h. also die Rekrutierung von Hochschulabsolventen für Positionen, in denen bislang Absolventen des dualen Systems und der darauf aufbauenden Fort- und Weiterbildungen gearbeitet haben. Vor allem bei begehrten Unternehmen finden Verdrängungsprozesse zugunsten von Fachkräften mit höheren Abschlüssen statt. Damit gehen für Absolventen des dualen Systems Aufstiegsmöglichkeiten verloren. „Es steht zu vermuten, dass diejenigen Bachelorabsolventinnen und -absolventen, die nun die Hochschulen verlassen und sich als ‚Generation Praktikum‘ in den Betrieben aufhalten, sukzessive auch Positionen besetzen werden, die zuvor Meistern und Technikern vorbehalten waren“ (Clement, 2010, S. 43).

Eine Arbeitsmarktbilanz für Deutschland bis 2025 ist Ergebnis einer Projektion des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB). Laut IAB-Studie (Fuchs & Zika, 2010) schrumpft das Erwerbspersonenpotenzial in Deutschland von 2010 bis 2020 um 1,8 Mio. Personen und danach bis 2025 um weitere 1,8 Mio. auf 41,1 Mio. Arbeitskräfte. Wird ausschließlich der demographische Effekt betrachtet, so würde das potenzielle Arbeitskräfteangebot in Deutschland bis 2025 um 6,7 Mio. Personen abnehmen. Jedoch wird dieser demographische Effekt durch die Zunahme der Erwerbsbeteiligung von Frauen und Älteren sowie durch Zuwanderung teilweise kompensiert. Es „ist zu erwarten, dass die Frauenerwerbsbeteiligung sowie die Lebensarbeitszeit steigen. Zusammen mit einer durchschnittlichen jährlichen Nettozuwanderung von 100.000 Personen schwächt dies den Rückgang auf etwa 3,5 Mio. ab“ (Fuchs, Söhnlein, & Weber, 2011, S. 1). Unter diesen Annahmen würde das Erwerbspersonenpotenzial bis 2025 Jahr für Jahr um mindestens 200.000 Personen abnehmen.

Auf der Nachfrageseite schwankt der Arbeitskräftebedarf bis 2025 leicht. Insgesamt wird die Erwerbstätigenzahl zwar stagnieren, jedoch in sektoral differenzierter Betrachtung im Verarbeitenden Gewerbe stark zurückgehen, in erster Linie ausgelöst durch weiterhin hohe Produktivitätssteigerungen. Gleichzeitig nimmt die Erwerbstätigenzahl in vielen Dienstleistungsbranchen, insbesondere bei den unternehmensbezogenen Dienstleistungen, zu. „Der Trend zur Dienstleistungsgesellschaft ist allerdings nicht gleichzusetzen mit einer De-Industrialisierung. Die Bruttowertschöpfung

im Verarbeitenden Gewerbe wächst auch in Zukunft überdurchschnittlich. Die Rationalisierungsmöglichkeiten der Industrie erlauben überdurchschnittliche Produktivitätssteigerungen, die mit einem geringeren Arbeitskräfteeinsatz einhergehen. Ferner haben Unternehmen in der Vergangenheit produktionsnahe Dienstleistungen ausgegliedert und die dort erzielte Wertschöpfung wird dann nicht mehr dem Verarbeitenden Gewerbe zugerechnet. Voraussetzung für das starke Wachstum der unternehmensnahen Dienstleistungen (auch als ‚moderne Umwegproduktion‘ bezeichnet) ist aber eine leistungsfähige industrielle Basis. Das künftige Verhältnis von Industrie und Dienstleistungen wird weiterhin durch Komplementarität und nicht Substitutivität gekennzeichnet sein“ (Fuchs & Zika, 2010, S. 6).

Insgesamt zeigt die Arbeitsmarktbilanz des IAB, dass die Unterbeschäftigung bis 2025 stark zurückgeht. Dieser Rückgang setzt jedoch voraus, dass der Arbeitskräftebedarf auch tatsächlich gedeckt werden kann. Zumindest in manchen Regionen könnte es jedoch zu einem Mangel an qualifizierten Fachkräften kommen. „Dies gilt umso mehr, je niedriger die Bereitschaft der Wirtschaft ist, ältere Arbeitnehmer zu beschäftigen. Künftig werden sie das größte Reservoir bilden, aus dem qualifiziertes Personal zu gewinnen wäre. So müssten beispielsweise Geringqualifizierte mittels geeigneter Weiterbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen das mittlere Qualifikationsniveau erreichen oder die Bildungssysteme durchlässiger werden, z. B. durch die Anerkennung von Qualifikationen, die in der Arbeit erworben wurden. Wenn dies nicht gelingt, besteht die Gefahr, dass es langfristig zu einem Fachkräftemangel bei gleichzeitig hoher Unterbeschäftigung kommen könnte“ (Fuchs & Zika, 2010, S. 8). Außerdem kann als gesichert gelten, dass über den IAB-Projektionszeitraum bis 2025 hinaus mit einer weiter stark schrumpfenden und alternden Bevölkerung gerechnet werden muss.

Die IAB-Projektion des Arbeitskräfteangebots bis zum Jahr 2050 schreibt diese Trends fort: Demnach könnte das Erwerbspersonenpotenzial schon 2030 unter 40 Mio. Personen gesunken sein. „Damit würde das Erwerbspersonenpotenzial (die höchstmögliche Zahl von Erwerbstätigen) unter der Zahl der heute tatsächlich Erwerbstätigen liegen“ (Fuchs, Söhnlein, & Weber, 2011, S. 7). Sollten diese Trends sich bis 2050 fortsetzen, dann geht das Arbeitskräfteangebot im Prognosezeitraum 2008 bis 2050 um insgesamt 12 Mio. Personen zurück. „Eine Abnahme des Arbeitskräfteangebots um ungefähr 12 Mio. Erwerbspersonen zwischen 2008 und 2050 dürfte aufgrund der hohen Sicherheit der demographischen Komponente ein sehr realistisches Szenario darstellen“ (Fuchs, Söhnlein, & Weber, 2011, S. 4). Da diese Projektion bereits eine steigende Erwerbsbeteiligung berücksichtigt, ist kaum mit weiteren Personalreserven zu rechnen.

Wirtschaft und Gesellschaft müssen sich längerfristig auf ein viel geringeres Arbeitskräftepotenzial einstellen. Jedoch führt der Rückgang des Arbeitskräfteangebots „nicht zwangsläufig zu einem Fachkräftemangel im Sinne eines dauerhaften Nachfrageüberschusses gegenüber dem Angebot. Zum einen werden sich langfristig die Kapital- und Gütermärkte und auch die Löhne auf den Rückgang des Arbeitskräfteangebots einstellen. Zum anderen können die Qualifikation des Erwerbspersonenpotenzials und seine Produktivität durch verstärkte Investition in Bildung und Ausbildung erhöht werden. Die hohe Arbeitslosigkeit von gering qualifizierten Arbeitskräften zeigt, dass ein Teil des an sich vorhandenen Potenzials kaum genutzt wird. Insofern tragen Bildungsanstrengungen längerfristig dazu bei, die Konsequenzen des sinkenden Erwerbspersonenpotenzials für die Wirtschaft und den Arbeitsmarkt zu mildern. Viele Maßnahmen, die politisch und wissenschaftlich diskutiert werden, um das Arbeitskräftepotenzial besser auszuschöpfen, sind im Übrigen in ihren Folgen auch gesellschaftlich höchst erwünscht. Die Anerkennung Älterer in der Gesellschaft, die Gleichberechtigung von Frauen und Männern (Vereinbarkeit von Familie und Beruf) und die Integration von Migranten sind hohe Zeile, deren Stellenwert

nun aus der Arbeitsmarktperspektive heraus noch zunimmt“ (Fuchs, Söhnlein, & Weber, 2011, S. 7). Bereits heute, aber auch zukünftig immer mehr, ist deshalb in den Unternehmen notwendig, die Arbeitsbedingungen an Erfordernisse der älter werdenden Belegschaften, an Erfordernisse der Vereinbarkeit von Familie und Berufe sowie an Erfordernisse der Chancengleichheit und Integration (Diversity Management) anzupassen.

Eine ähnliche Situation wie im gesamten Bundesgebiet wird für Baden-Württemberg erwartet: Mit einer Arbeitskräftelücke von rund 500.000 Erwerbstätigen bis 2030 rechnet die Prognos AG in einer Studie für das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Sofern keine Maßnahmen zur Reduzierung dieser Lücke eingeleitet werden, würde dies bedeuten, dass 10 % der benötigten Erwerbstätigen aller Qualifikationsstufen bis 2030 fehlen werden, davon 210.000 Hochschulabsolventen, 230.000 Personen mit beruflichen Bildungsabschlüssen und 60.000 Personen ohne berufliche Bildung. In der Gesamtbetrachtung handelt es sich „um einen Mangel in allen Qualifikationsstufen und somit nicht nur um Fachkräfte- sondern um generellen Arbeitskräftemangel in Baden-Württemberg“ (Prognos, 2009, S. 4). Nach Sektoren differenziert liegt die Erwerbstätigenlücke im Verarbeitenden Gewerbe im Jahr 2030 bei 80.000 Personen, davon die Hälfte Hochschulabsolventen. Eine „Allianz für Fachkräfte“ wurde Ende 2011 vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (MFW) gemeinsam mit Gewerkschaften und Wirtschaftsverbänden ins Leben gerufen. Laut Fachkräfteallianz gibt es bereits 2012 einen akuten Fachkräftengpass in bestimmten Berufen, z. B. bei Ingenieuren, Informatikern, Technikern, aber auch auf Facharbeiterebene in Elektro- und Metallberufen. Gleichwohl gilt es im Blick zu behalten, dass Fachkräftemangel auch Folge einer ungleichen Verteilung der Teilhabechancen ist. „Ein Beschäftigungs- und Produktionsmodell, das auf Innovationskraft und Fachkräfte setzt, wird die Frage von Bildung und Teilhabechancen gerade bei veränderten globalen Märkten und gravierenden technologischen Umbrüchen, erneut zu einer zentralen Zukunftsfrage machen müssen“ (Hofmann J. , 2010, S. 41).

Es ist – so ein Fazit, das für die ELAB-Fragestellung gezogen werden kann – also zwar davon auszugehen, dass es in Deutschland und in Baden-Württemberg im Betrachtungszeitraum von ELAB bis 2030 zu einem demographisch bedingten, klaren Rückgang im Arbeitskräfteangebot kommen wird. Hieraus aber im Sinne des Gleichgewichts von Angebot und Nachfrage den Schluss zu ziehen, Produktionsarbeitsplätze hierzulande in Folge des technologischen Wandels einzudampfen, schon allein gesellschaftspolitisch gesehen fatal wäre. Auch für mittlere Qualifikationen und für Einfach Tätigkeiten sollte die Industrie langfristig Arbeitsplätze zur Verfügung stellen, um zur sozialen Kohäsion beizutragen. Und auch im Eigeninteresse von Industrieunternehmen liegt es, die räumliche Nähe zwischen Entwicklung bzw. Innovation und Produktion aufrechtzuerhalten. Ein hervorragender Technologiestandort für Elektromobilität – wie es der Zielsetzung von Baden-Württemberg und Deutschland entspricht – bezieht seine Stärke auch aus Synergien, Rückkoppelungsprozessen und gegenseitigen Lerneffekten mit dem gleichzeitig vorhandenen Produktionsstandort. „Nur wer Erfahrung aus der Produktion auf kurzem Wege in die Entwicklung zurückspeigeln kann, wird ‚best in class‘ werden können“ (Abele & Reinhart, 2011, S. 6). Die Industrialisierung der Elektromobilität sollte demnach weiterhin eine wichtige Zielsetzung für Unternehmen und Politik sein.

7.8 Wirkungsanalyse Qualifikationen: Resümee und Ausblick

Innerhalb des ELAB-Arbeitspakets zur qualitativen Wirkungsanalyse auf Beschäftigung standen der Wandel der Kompetenzanforderungen und neue Qualifikationserfordernisse an die in der Antriebsstrangproduktion Beschäftigten im Zentrum. In Stichworten zusammengefasst sind die Kernpunkte des Kapitels „Kompetenzanforderungen und Qualifikationen“:

- Bedeutungszunahme Elektrik/Elektronik („von M/M zu E/E“): Elektrische und elektronische Komponenten und Systeme werden im Automobil immer bedeutender. Ein Treiber der Elektrifizierung ist der Systemwechsel zur Elektromobilität, ein anderer wichtiger Treiber ist die Durchdringung von Infotainment im Automobil. Diese Bedeutungszunahme von E/E schlägt auch auf Produktionstätigkeiten durch. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, langfristige Bildungsstrategien für die Beschäftigten in den mechanischen Fertigungsbereichen und in der Montage in Richtung E/E-Kompetenzen zu entwickeln.
- Bedeutungszuwachs Montagetätigkeiten („Schwerpunktmäßig formgebende Fertigungsprozesse werden vom Schwerpunkt Montageprozesse sukzessive abgelöst“): Montageprozesse gewinnen beim Elektroantrieb sukzessive an Bedeutung gegenüber formgebenden Fertigungsverfahren wie Zerspanung und Umformung, die beim Verbrennungsmotor stärker im Zentrum standen. Damit verändern sich die Kompetenzanforderungen an die Beschäftigten in der Komponentenproduktion.
- Industrielle Montagearbeit kann nicht auf „Einfacharbeit“ reduziert werden („Montage wird komplexer und anspruchsvoller und ist alles andere als ‚nur‘ einfache Arbeit“): Ein „Qualifikationsshift“ hin zu immer wichtiger werdenden Fach- und Prozesskompetenzen in Verbindung mit steigender Komplexität und Flexibilität ist zu beobachten. Gleichzeitig wird die Bedeutung von Erfahrungswissen in der Montagearbeit immer stärker anerkannt.
- Der Umgang mit Hochvolt-Systemen wird im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs als ein zentrales neues Qualifikationserfordernis für Facharbeiter und weitere Beschäftigte in Produktions- und Montagebereichen angesehen. Für „nach-SoP-Beschäftigte“ in den Produktionsbereichen reicht jedoch vielfach eine „Hochvolt-Sensibilisierung“ als Qualifikationsmaßnahme aus. Für die Beschäftigten ab der Inbetriebnahme des Hochvolt-Systems sowie in Prüfung und Nacharbeit sind weitere Qualifizierungsmaßnahmen im Stufenkonzept nach BGI 8686 notwendig.
- Erweiterte Kompetenzanforderungen in Richtung Genauigkeit, Sorgfalt, Reinraum ergeben sich im Bereich des konventionellen Antriebsstrangs aus der Optimierung von Verbrennungsmotor und Getriebe.
- Neue Werkstoffe und Leichtbauweise werden für den gesamten Automotive-Bereich, also über den reinen Antriebsstrang hinaus, als Themen immer wichtiger, woraus sich ebenfalls neue Kompetenzanforderungen für Facharbeiter und Entwickler ableiten.
- Berufliche Ausbildung im dualen System: Die bestehenden Berufsbilder im gewerblich-technischen Bereich sind offen für die Integration neuer, elektromobilitäts-spezifischer Qualifikationsinhalte und werden somit den neuen Qualifikati-

onsanforderungen gerecht. Neue Module, wie z. B. der Umgang mit Hochvolt-Systemen, können in die bestehenden, flexiblen Berufsbilder integriert werden.

- Wandel im Mix der Ausbildungsberufe („von M/M-Berufen hin zu E/E-Berufen“): Der in der Automobilindustrie bereits seit Jahren zu beobachtende strukturelle Wandel im Berufemix in Richtung mechatronische Berufe und industrielle Elektroberufe wird sich durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs weiter fortsetzen.
- Weiterbildung: Erforderlich sind spezifische Weiterbildungsmaßnahmen, die als arbeitsprozessorientierte Lernkonzepte implementiert werden sollten. Die Standardisierung von Qualifizierungsinhalten und -abschlüssen – insbesondere im stark wachsenden Angebot der Weiterbildung rund um den Umgang mit Hochvolt-Systemen (Sensibilisierung, Elektrofachkraft etc.) – ist eine vordringliche Aufgabe.
- Arbeitsschutz: Die größten Auswirkungen auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz sind durch den Umgang mit den Traktionsbatterien zu erwarten. Mit Gefahren durch elektrische Spannung in Hochvolt-Bereichen und durch zusätzliche Gefahrstoffe (z. B. Lithium) ist insbesondere in den Produktions- und Werkstattbereichen zu rechnen.
- Komponentenspezifische Qualifikationserfordernisse:
Traktionsbatterien erfordern im gesamten Produktionsprozess die Sicherstellung hoher, gleichbleibender Qualität. Wesentliche Kompetenzanforderungen beim Produktionsprozess des Batteriesystems (ab Packaging) sind Verbindungs- und Fügetechnik (Arbeiten unter Spannung), Qualitätssicherung, Prüfung und Tests (Elektrik, Dichtigkeit). Eine sehr hohe Automatisierung ist bei künftig höheren Stückzahlen zu erwarten.

Elektromotoren werden künftig ähnlich hochautomatisiert produziert. Durch die hohe Automatisierung werden für die Beschäftigten im Produktionsprozess v. a. Kompetenzen wie Einrichten, Bedienen, Überwachen und Warten der automatisierten Anlagen sowie Testen, Prüfen und Qualitätssicherung immer wichtiger.

Leistungselektronik erfordert in der Produktion zum einen Facharbeiter mit Elektronik- oder Mechatronik-Ausbildung, die z. B. hochautomatisierte Anlagen überwachen und instandhalten oder in Test und Qualitätssicherung eingesetzt werden, zum anderen angelernte Beschäftigte, z. B. in der Bauelemente-Bestückung.

Brennstoffzellensysteme erfordern in der Produktion technische Kompetenzen rund um Dünnfilm-Bearbeitung und elektrochemische Beschichtung sowie Kompetenzen in den Bereichen Sorgfalt, Reinheit, Qualitätssicherung. Dazu sind für die Produktion von Wasserstofftanks spezifische Kenntnisse insbesondere im Bereich Leichtbau und Hochdruck erforderlich.

- Berufliche Bildung in der Region: In Automotive-Regionen sind Bildungseinrichtungen vielfach stark auf den klassischen Metall- und Mechanik-Bereich orientiert. Elektromobilitätsspezifische Qualifikationsinhalte (Kompetenzen in Elektrik/Elektronik, Umgang mit Hochvolt-Systemen) sollten stärker in die bestehenden Weiterbildungsangebote integriert werden.
- Regionales Arbeitsmarktmanagement unter Einbeziehung der relevanten Akteure: Bildung einer Plattform bzw. eines Netzwerks aller Akteure der beruflichen und akademischen Bildung, um abgestimmte Konzepte hinsichtlich zukünftiger Maßnahmen sowie eine koordinierte, transparente Umsetzung zu erreichen. Initie-

zung eines regionalen Arbeitsmarktmanagements als Gestaltungs- und Steuerungsinstrument für regionale Arbeitsmärkte und Qualifizierungssysteme.

- Arbeitsmarkt und demographischer Wandel: Der demographische Wandel wird einen großen Einfluss auf die zukünftige Arbeitswelt in der Autoindustrie ausüben (ob mit oder ohne Elektromobilität). Ein stark rückläufiges Erwerbspersonenpotenzial bis 2030 (und darüber hinaus) und der anhaltende Trend zur Akademisierung der Arbeitswelt könnten zu Engpässen am für die Antriebsstrangproduktion relevanten Arbeitsmarkt führen. Als Konsequenz gilt es, das Arbeitskräftepotenzial besser auszuschöpfen und Teilhabechancen für alle zu verbessern (Anpassung der Arbeitsbedingungen an Erfordernisse der älter werdenden Belegschaft, der Vereinbarkeit von Familie und Beruf, der Chancengleichheit und Integration).

Der dargestellte Wandel bei Qualifikationserfordernissen als ein Teil der „neuen Arbeitswelt“ kann, das bestätigen auch die zahlreichen Expertengespräche im Rahmen von ELAB, als gesichert gelten, sofern sich elektrifizierte Antriebsstränge auf dem Automobilmarkt durchsetzen. Welche weiteren qualitativen Wirkungen auf die Arbeitswelt mit Elektromobilität einhergehen, ist dagegen weitgehend offen und soll im Folgenden an den Beispielen „Dequalifizierungsthese“ und „Flexibilisierungsthese“ diskutiert werden.

Die nächsten Jahre werden zeigen, ob es in der Komponentenproduktion in Folge zunehmender Bedeutung von Montageprozessen zu Strukturverschiebungen von Facharbeiter-Tätigkeiten hin zu Angelernten-Tätigkeiten bzw. industrieller Einfacharbeit kommt. Eine solche – möglicherweise plausible – „Dequalifizierungsthese“ könnte durch eine sehr hohe Automatisierung der Komponentenproduktion konterkariert werden – dann werden zwar insgesamt weniger Arbeitskräfte benötigt, die dafür umso besser qualifiziert sind. Steigende Qualifikationsanforderungen könnten auch in der weiteren Prozesskette eine Rolle spielen: Zumindest in der langen Übergangsphase mit verschiedenen Antriebskonzepten wird sich die Komplexität im Pkw-Montagewerk erhöhen. Wenn konventionelle Antriebsstränge im Mix mit elektrifizierten und reinelektrischen Antriebssträngen verbaut werden, kommt es zu „komplizierteren Hochzeiten im Aufbauwerk“, weil die „Umstellung auf einen solchen Mischverbau bei der Pkw-Montage für viele Mitarbeiter schwierig ist“ (Exp.) – Kompetenzanforderungen in der Linie steigen also, was auch hier einer Dequalifizierungsthese widersprechen würde.

Elektromobilität als Treiber für die Flexibilisierung von Arbeit – Anzeichen für einen „Flexibilisierungsdruck durch den industriellen Wandlungsprozess ‚Elektromobilität‘ auf die automobilen Arbeitsorganisation bei Herstellern und Zulieferern“ gehen Soziologen an der Universität Eichstätt nach (Siebenhüter & Meyer, 2011). Seit geraumer Zeit versuchen nach dieser „Flexibilisierungsthese“ sowohl OEM, Zulieferer als auch Engineering-Dienstleister, dem Wettbewerbsdruck in der Automobilbranche mit einer Flexibilisierungsstrategie zu begegnen. Die Vielfalt von Antriebsstrangkonzzepten und die komplexe Entwicklung und Produktion von Hybrid- und Elektroautos ist mit Unsicherheiten für Hersteller und Zulieferer verbunden. „Aus diesen Unsicherheiten und möglichen Fehlerquellen entsteht für alle an der Entwicklung beteiligten Akteure ein erhöhter Flexibilisierungsdruck, um auf mögliche technologische, gesetzliche oder gesellschaftliche Veränderungen zügig reagieren zu können“ (Siebenhüter & Meyer, 2011, S. 193). Ein wichtiger Faktor aus Sicht der Unternehmen sei hierbei die Erhöhung der externen Flexibilität, also die Möglichkeit, durch Zeitarbeit und Werkverträge die Zahl der Beschäftigten dem Bedarf anzupassen. Demnach hätte der industrielle Wandlungsprozess zur Elektromobilität auch eine Ausweitung der flexiblen Belegschaft, also der Leiharbeit- und Werkvertragsnehmer, zur Folge. Hingegen spricht die Notwendigkeit, qualifizierte Arbeitskräfte aus den „neuen Kompetenzfeldern“ an das Unternehmen zu binden, gegen eine starke

Ausweitung atypischer Beschäftigung. Alles in allem bleibt – so das vorläufige Resümee zu diesen beiden Thesen – zunächst offen, welchen Gehalt sowohl die „Flexibilisierungsthese“ als auch die „Dequalifizierungsthese“ für die Arbeitswelt im „Zeitalter der Elektromobilität“ haben.

Alles in allem ist eine Ablösung konventioneller Antriebe durch elektrifizierte und reinelektrische Antriebsstränge, wie sie in den nächsten Jahrzehnten erwartet wird, für die Automobilindustrie mit einem tiefgreifenden Technologiewandel gleichzusetzen. Mit dem mittel- bis langfristigen Umstieg auf Elektromobilität ist auch ein Wandel in der Arbeitswelt verbunden. Wie gezeigt werden konnte, werden sich Kompetenzanforderungen und Qualifikationen nach und nach verändern. In der Antriebsstrangproduktion werden Elektrik/Elektronik-Qualifikationen immer wichtiger, die Dominanz klassischer Metall- und Mechanik-Qualifikationen erodiert zunehmend. Gleichzeitig erfahren Montageprozesse im Vergleich zu formgebenden Fertigungsverfahren einen Bedeutungszuwachs. Insgesamt ist ein Wandel bei den Kompetenzanforderungen in der Antriebsstrangproduktion vorgezeichnet, der in Richtung Elektrotechnik, Mechatronik, Informatik, Werkstoffverhalten, Kunststoffbearbeitung, Chemie, Mikrosystemtechnik sowie Prozesssicherheit bei neuen Produktionsprozessen, Messen/Prüfen und Qualitätssicherung geht. Erweiterte Kompetenzanforderungen für Produktionsbeschäftigte resultieren zusätzlich aus der Optimierung des Verbrennungsmotors und aus dem Leichtbau. Der Umgang mit Hochvolt-Systemen wird zunehmend ein wichtiges Qualifikationserfordernis; nach Produktionsbereichen differenziert in erster Linie bei der Batterieproduktion und beim Aufbau von Hybrid- und Elektroautos im Pkw-Montagewerk, bei anderen Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs erst ab der Inbetriebnahme. Nur mit qualifizierten Fachkräften kann die Industrialisierung der neuen Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs in Deutschland gelingen – und damit Beschäftigung und Wertschöpfung gesichert werden.

8 Wertschöpfungskette, Branchenumfeld, Strategische Allianzen

Autoren: Marius Brand (Fraunhofer IAO), Florian Herrmann (Fraunhofer IAO), Jürgen Dispan (IMU Institut)

8.1 Branchenumfeld (insbesondere Zuliefererstruktur in Baden-Württemberg)

Die Wertschöpfungskette der Automobilindustrie und das Branchenumfeld werden im Rahmen des Forschungsprojekts ELAB im Sinne einer „Wirkungsabschätzung“ untersucht, bei der die Frage nach Wirkungen auf Zuliefererstrukturen und nach künftigen Herausforderungen für Zulieferer in der Standortumgebung im Zentrum stehen.

Der technologische Wandel „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ ist – verbunden mit einem gesellschaftlichen Wandel bei Mobilitätskonzepten – als langfristiger Systemwechsel für die weltweite Automobilindustrie zu betrachten. Dieser Wandel stellt Automobilhersteller, ihre Zulieferer und alle weiteren mit der Automobilwirtschaft verknüpften Branchen vor enorme Herausforderungen. Herausforderungen, vor denen in der räumlichen Dimension auch die regionalwirtschaftlichen Schwerpunkte des Automotive-Bereichs stehen – spricht die jeweilige „Standortumgebung“ wie z. B. der Automotive-Cluster in Baden-Württemberg.

Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden Wertschöpfungsanteile neu verteilt – sowohl zwischen entfallenden und neuen Komponenten als auch zwischen etablierten und neuen Unternehmen in der Wertschöpfungskette. Die besondere Herausforderung für etablierte Zulieferer mit einer hervorragenden Kompetenz im verbrennungsmotorbasierten Antriebsstrang liegt in der Fortschreibung des erarbeiteten Wettbewerbsvorteils in der etablierten Technologie bei parallelem Aufbau von Kompetenz und Produktionskapazität hinsichtlich der alternativen Antriebe. Dem „Management des Wandels“ kommt damit eine besondere Bedeutung zu; und zwar sowohl für die Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette als auch für das institutionelle Umfeld.

Das Management des Wandels geht weit über den Umgang mit technologischen Herausforderungen hinaus, wie auch Ende 2011 eine Untersuchung des Deutschen Dialog Instituts für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie konstatierte. Demnach stehe Deutschland im Innovationsfeld Elektromobilität weniger vor technischen Problemen, „als vielmehr vor der gesellschaftlichen, sozialpsychologischen und politischen Herausforderung, solche strategisch wichtigen Innovationsfelder koordiniert zu entwickeln und die erforderliche gesellschaftliche Akzeptanz (und Kundenbegeisterung) zu generieren. ... Viele Akteure bemängeln eine erhebliche qualitative (Informationszugang) und quantitative (Informationsübersetzung) Intransparenz hinsichtlich verfügbarer Forschungsergebnisse, Aktivitäten oder Initiativen sowie in Bezug auf mögliche Kooperationspotenziale. ... Speziell den KMU ist es aufgrund einer fehlenden Infrastruktur häufig nicht möglich, an für sie relevante Informationen oder potenzielle Kooperationspartner zu gelangen“ (Deutsches Dialog Institut, 2011, S. 31-32). Die empirischen Ergebnisse dieser Analyse des „Umbruchs aus Sicht der Akteure“ zeigen, ebenso wie die im Rahmen von ELAB durchgeführten Experteninterviews sowie verschiedene auf Baden-Württemberg bezogene, weiter unten dargestellte Untersuchungen, dass vor allem kleine und

mittlere Unternehmen aus der Zulieferindustrie bisher kaum auf den Technologiewandel vorbereitet sind.

Wertschöpfungskette,
Branchenumfeld,
Strategische Allianzen

Chancen und Herausforderungen für Automotive-Zulieferer durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs werden im Folgenden am Beispiel Baden-Württembergs dargestellt. Baden-Württemberg ist einer der weltweit bedeutendsten Automobilstandorte, in dem sich Fahrzeughersteller, Automobilzulieferer, unternehmensorientierte Dienstleister, Forschungsinstitute, Bildungseinrichtungen und Hochschulen mit spezialisierter Forschung und Lehre einzigartig ballen – und somit einen regionalwirtschaftlichen Cluster bilden. In allen Regionen Baden-Württembergs gibt es – mehr oder weniger zahlreich – Betriebe aus der Automobilwirtschaft. Hochburg dieses Automotive-Clusters ist die Region Stuttgart mit einem Umsatzanteil von 56 % im Jahr 2010 (gemessen am Fahrzeugbau-Umsatz Baden-Württembergs), wichtige weitere Zentren sind die Regionen Heilbronn-Franken (15 %) und Mittlerer Oberrhein (11 %) (Dispan, Koch, Krumm, & Seibold, 2011, S. 93). Insgesamt sind im Automotive-Cluster Baden-Württemberg im Jahr 2010 mehr als 410.000 Beschäftigte tätig, davon ca. 120.000 bei Automobilherstellern und ca. 190.000 bei Zulieferern; die restlichen 100.000 verteilen sich auf Automotive-bezogene Dienstleistungen (z. B. bei Engineering-Dienstleistern) und auf Handwerksbetriebe (Spath, et al., 2011, S. 50).

Für die starke Wirtschaftskraft des Automotive-Clusters Baden-Württemberg stehen Unternehmen wie Daimler, Audi und Porsche als Hersteller (OEM) von Premium-Automobilen mit großen Produktions- und Entwicklungsstandorten im Land. In gleichem Maße stehen dafür Zulieferer mit Hauptsitz in Baden-Württemberg wie Bosch, ZF Group, Mahle, Behr, Getrag, Freudenberg, KSPG, Eberspächer und Mann+Hummel, die allesamt in den „Top-100-Automotive-Suppliers 2010“ gelistet sind.¹ Ferner gehören dazu weitere Zulieferer aus den Top-100 mit dem Deutschland-Sitz oder großen Betriebsstätten in Baden-Württemberg wie z. B. BorgWarner, Beru Systems, Faurecia, Federal Mogul, Harman International, Magna, TRW und Valeo. Diese großen Unternehmen beliefern die Automobilhersteller häufig direkt und befinden sich damit in einer Tier-1-Position.² Weitere essentielle Bestandteile des Automotive-Clusters sind zahlreiche mittelständische Zulieferer (KMU-Zulieferer), die sich häufig in einer vorgelagerten Position in der Wertschöpfungskette befinden (Tier-2 oder Tier-3), also keine Direktlieferanten für die OEM sind. Viele der rund 1.000 KMU-Zulieferer sind in der Wirtschaftszweig-Systematik nicht dem Fahrzeugbau zugeordnet, sondern anderen Branchen wie dem Metallgewerbe oder der Kunststoffverarbeitung. Und auch Ausrüster, z. B. aus dem Maschinen- und Anlagenbau, sind teilweise eng mit dem Automotive-Cluster verknüpft. Hier sind Unternehmen aus dem Werkzeugmaschinenbau wie Heller, MAG und Schuler sowie aus dem Anlagenbau wie Dürr und Eisenmann hervorzuheben.

¹ Zeitschrift „Automobil-Produktion“, Sonderheft „Top 100 Automotive Suppliers Global Ranking“, July 2011.

² Tier (engl.) = Rang / Tier-Position bezeichnet die Stellung in der Wertschöpfungskette.

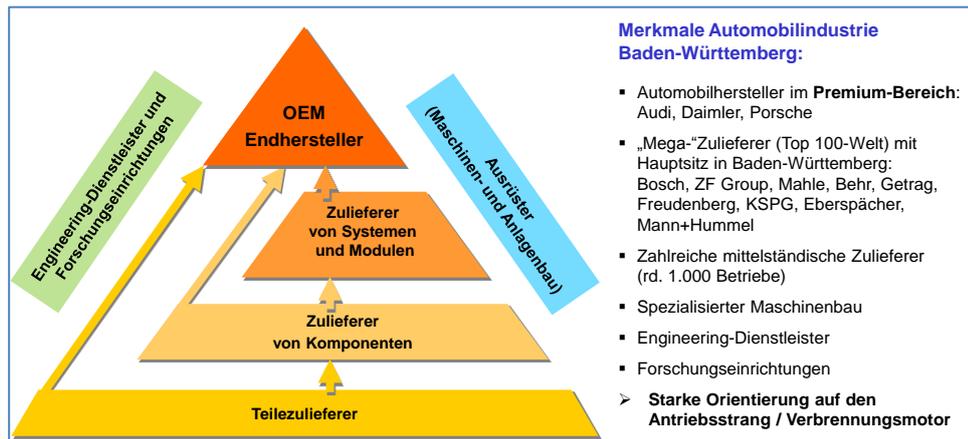


Abbildung 106: Automotive-Cluster Baden-Württemberg: Struktur der Wertschöpfungskette (Grafik: IMU Institut)

Die Automotive-Zulieferer in Baden-Württemberg können nach ihrer Spezialisierung in verschiedene Technologiebereiche unterschieden werden: Antrieb / Powertrain (Motor und Aggregate), Ausstattung / Interieur (Airbag, Cockpit, Sitze, Klimasystem), Fahrwerk (Lenkung, Bremssystem, Federung, Räder), Karosserie (Rohbau, Anbauteile, Beleuchtung) und Elektronik (Stromversorgung, Motormanagement, Infotainment). Viele der Autozulieferer in Baden-Württemberg sind auf den Antrieb bzw. Powertrain spezialisiert. Nicht zuletzt durch diese starke Orientierung auf den Powertrain hat ein Wandel hin zur Elektromobilität enorme Auswirkungen für das „Autoland Baden-Württemberg“ (Dispan & Meißner, 2011). Alles in allem ist der Automotive-Cluster Baden-Württemberg nach quantitativem und qualitativem Umfang und nach Komplexität als ein komplett ausgestatteter Cluster zu bezeichnen. Zwei besondere Merkmale sind dabei hervorzuheben: Marktseitig ist es die Dominanz des Premiumbereichs, wofür allein schon die Marken Mercedes-Benz, Porsche und Audi stehen. Technologieseitig ist es die starke Orientierung von Herstellern und Zulieferern auf den Antriebsstrang bzw. auf den Verbrennungsmotor.

Wie gezeigt wurde, gibt es in Baden-Württemberg eine breit gefächerte Zulieferindustrie, die jedoch einen Schwerpunkt im Bereich Antriebsstrang aufweist und in der Konsequenz stark auf den Verbrennungsmotor ausgerichtet ist. Damit ist die badenwürttembergische Zulieferindustrie mit Unternehmen wie Mahle, KSPG, ZF, Getrag etc. in ihren Kernkompetenzen am Maschinenbau orientiert. Für diese größeren und für zahlreiche KMU-Zulieferer bedeutet der technologische Wandel, dass zahlreiche der von ihnen produzierten Bauteile langfristig nicht mehr benötigt werden: Beim Elektroauto entfallen neben dem Verbrennungsmotor (mit Kurbelgehäuse, Zylinderkopf, Nockenwelle, Kurbelwelle, Kolben, Dichtungen, Ventile, ...) auch die Abgasanlage, das Einspritzsystem, der Turbolader, der Kraftstofftank, die Lichtmaschine etc. (Dispan, Krumm, & Seibold, 2009). Somit bestehen für die Zulieferer rund um den Antriebsstrang langfristig gesehen Substitutionsrisiken, bereits mittelfristig werden jedoch Umsatz- und Wertschöpfungsanteile am Automobil – Stichwort Hybridautos – neu verteilt. Grund genug für einen Einstieg von Zulieferern in den elektrifizierten Antriebsstrang, um neue Chancen im Automotive-Bereich zu nutzen (Nauheimer, 2010).



Abbildung 107: Unternehmen aus der Zulieferindustrie in Baden-Württemberg (rund um das Antriebskonzept Verbrennungsmotor) (Grafik: IMU Institut).

Automotive-Experten erwarten, dass es mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette zu maßgeblichen Veränderungen kommen wird. Neben etablierten Zulieferern, die neue Technologien implementieren und „elektromobile Märkte“ rund um die neuen EV-Komponenten erschließen, werden auch neue Akteure aus anderen Branchen, wie Elektromaschinenbauer, Batteriehersteller, Unternehmen der Informations- und Kommunikationstechnologie etc. in den Markt drängen und sich als Automotive-Zulieferer positionieren. „Die Karten werden völlig neu gemischt“, so ein OEM-Vertreter im Expertengespräch. Unabhängig davon das Statement des Entwicklungsleiters eines großen Zulieferers: „Die OEM halten die Karten sehr dicht an der Brust!“ (Exp.). Beide Zitate verdeutlichen die Umbruchsituation, die vor allem bei Zulieferern, und hier speziell nochmals bei KMU-Zulieferern, zu Unsicherheiten führt. Gerade die „fehlende Einbindung in längerfristige technologische Weichenstellungen macht es den Zulieferern schwer, die Bedarfe der Industrie realistisch einzuschätzen und sich auf künftige Technologien vorzubereiten“ (Friedrich & Schmid, 2011, S. 109). Für viele Zulieferer scheint die Zukunft ungewisser denn je. Weitgehend offen bleibt in diesem „Spiel“ vorerst noch, wie sich die Arbeitspakete zwischen OEM und Zulieferer aufteilen, ob die neuen EV-Komponenten Katalogware werden und als Commodity gehandelt werden und auch welche Know-how-Bedarfe überwiegen: Integration von Mechanik in Elektrik oder Elektrik in Mechanik? (Naunheimer, 2010). Da sich die Zukunft des Wertschöpfungs-systems „elektrifizierter Antriebsstrang“ nicht klar prognostizieren lässt, müssen sich die Zulieferer in hohem Maße Flexibilität bewahren, aber auch strategische Frühaufklärung betreiben und eigene Timing-Strategien für den Markteintritt entwickeln, um neue Chancen im Automotive-Bereich nutzen zu können (Götze & Rehme, 2011).

„Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet?“ und „Automobilzulieferer in Baden-Württemberg unter Strom?“ – diesen Fragen gehen zwei Studien vom Fraunhofer ISI nach. Demnach sei der Trend zu alternativen Antriebskonzepten nicht mehr aufzuhalten. Für den Automobilstandort beinhalte der tiefgreifende Strukturwandel Chancen für neue Produkte und Verfahren, aber auch deutliche Risiken nicht nur für Premiumhersteller, sondern auch für die vielen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU-Zulieferer) (Stahlecker, Lay, & Zanker, 2011). Jedoch wird die technologische Zukunftsfähigkeit zahlreicher baden-württembergischen Automobilzulieferer bei alternativen Antriebskonzepten deutlich kritischer eingeschätzt als bislang angenommen.

Die großen Systemlieferanten in der Spitze seien zwar gut gerüstet; sie scheinen „darauf vorbereitet zu sein, im Falle einer breiteren Diffusion neuer Antriebskonzepte wegfallende Zulieferteile für konventionelle Antriebe durch neu entwickelte Komponenten und Systeme für die Elektromobilität ersetzen zu können“ (Zanker, Lay, & Stahlecker, 2011, S. 11).

Die Breite der kleinen und mittleren Firmen sei aber weniger gut aufgestellt; mithin sei das Gros der stark mittelständisch geprägten Zulieferindustrie Baden-Württembergs im Hinblick auf die anstehenden Herausforderungen des Technologiewandels im Antriebsstrang eher schlecht gerüstet. Bei KMU-Zulieferern, die „in der Zulieferkette weiter unten stehen und die wenig eigene FuE betreiben ... ist das Aufmerksamkeitsniveau gegenüber den Entwicklungen rund um die Elektromobilität so gering, dass Probleme wohl kaum antizipiert werden können“ (Zanker, Lay, & Stahlecker, 2011, S. 7). Folgende Engpässe werden vom Fraunhofer ISI identifiziert:

- Generelle Innovations- und Technologiedefizite bei KMU-Zulieferern erschweren eine adäquate Reaktion auf die Herausforderung Elektromobilität: z. B. unterdurchschnittliche Performance bei FuE-Quote, bei Prozessinnovationen, bei Kooperationsintensität.
- Unzureichende Awareness bei KMU hinsichtlich der Konsequenzen des Übergangs zur Elektromobilität für das eigene Unternehmen: z. B. geringe Vorausschaukapazitäten, eingeschränkte Informationsbasis, schlechte Wahrnehmung von Forschungsergebnissen.
- Geringer Anteil von KMU mit aktuellen Produktentwicklungen in Richtung Zulieferung für Komponenten neuer automobiler Antriebstechnik: z. B. Defizite bei Produktentwicklung, technologischer Fokus auf klassische Verbrennungsmotoren.

Aus diesen Studienergebnissen wird großer Handlungsbedarf insbesondere für die KMU-Zulieferer abgeleitet, damit sie „auch mittel- bis langfristig die technologische Anschlussfähigkeit bzw. den Technologievorsprung im internationalen Vergleich und somit auch die Zukunftsfähigkeit wahren können“ (Stahlecker, Lay, & Zanker, 2011, S. 27).

Die zukünftige Leistungsfähigkeit der baden-württembergischen Zulieferindustrie zeigt mehrere Facetten: Einerseits ist sie „in konventionellen Technologiefeldern zweifelsfrei gut bis sehr gut aufgestellt, teilweise sogar Weltspitze. Andererseits scheint der Großteil der Zulieferbetriebe im Hinblick auf zukünftige alternative Antriebskonzepte nicht so gut gerüstet zu sein, wie dies allgemein angenommen wird“ (Stahlecker, Lay, & Zanker, 2011, S. 87). Daraus resultierend werden in der ISI-Studie drei strategische Handlungsoptionen für KMU-Zulieferer aufgezeigt und kontrastiert:

- Strategische Option 1: In den tradierten Technologiepfaden verharren und sich den Marktentwicklungen in passiver Form anpassen.
- Strategische Option 2: Technologiepfade beibehalten und diversifizieren – „Diversifizierungsstrategie“.
- Strategische Option 3: Schritthalten mit den Innovatoren und in deren Fahrwasser schwimmen – aktives Handeln im technologischen Wandel des Automotive-Bereichs, sowohl was Produktinnovationen als auch was Prozess- und Fertigungskompetenzen betrifft.

Laut Autoren der ISI-Studie stellt die letztgenannte Handlungsoption „für die Autozulieferbetriebe ebenso wie für die gesamte Wirtschaftsregion ... die wirtschaftlich wahrscheinlich attraktivste dar“ (Stahlecker, Lay, & Zanker, 2011, S. 90). Die Praxis und die Strategien insbesondere von größeren Zulieferern wie Bosch, Elring Klinger und ZF zeigen jedoch, dass ein Mix der beiden Optionen „alternative Technologien aktiv mitgestalten“ und „Diversifizierung in geeignete Non-Automotive-Bereiche“

durchaus sinnvoll sein kann. Dies gilt besonders für KMU-Zulieferer, die meist über eine hohe Prozesskompetenz verfügen: „Die mittelständischen Zulieferer ab der Tier-2-Ebene, also die klassischen Lieferanten von Komponenten und Teilen, zeichnen sich in der Regel durch hervorragende Prozesskompetenzen aus und sind nicht so stark auf Produkte fokussiert. Damit verfügen sie zumindest theoretisch über eine nicht zu unterschätzende Diversifikationsfähigkeit“ (Exp.).

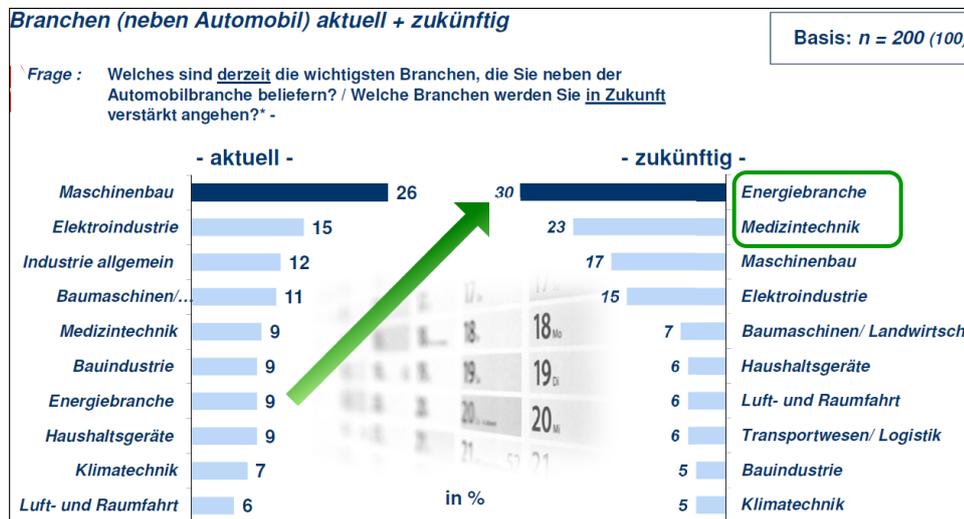


Abbildung 108: Reorganisation der Wertschöpfungskette – Unternehmensstrategien: Diversifizierung gewinnt bei Zulieferern an Bedeutung (Puls-Marktforschung, 2011).

Neben der Diversifizierung in neue Felder innerhalb des Automotive-Bereichs, spielt bei manchen Zulieferern auch die Diversifizierung in Bereiche außerhalb der Automobilindustrie zunehmend eine Rolle. Strategien, Geschäftsaussichten und Markttrends analysierte die Studie „Automobilzulieferer im Wandel“, die von der Zeitschrift Automobil-Produktion beauftragt wurde (Puls-Marktforschung, 2011). Der Trend zur Diversifizierung entfaltet demnach eine starke Dynamik, wie schon allein die rückläufigen Umsatzanteile von Zulieferern mit der Automobilbranche anzeigen. Die aktuell wichtigsten Branchen, die Zulieferer neben der Automobilbranche beliefern sind der Maschinenbau und die Elektroindustrie. Zukünftig wollen die befragten Automobilzulieferer verstärkt in folgenden Branchen Abnehmer erschließen: An erster Stelle steht die Energiebranche, die 30 % der Zulieferer verstärkt angehen wollen, es folgen die Medizintechnik (23 %), der Maschinenbau (17 %) und die Elektroindustrie (15 %). Beispiele für solche Diversifizierungsstrategien finden sich auch bei baden-württembergischen Automobilzulieferern: Bosch baut im Rahmen einer „fokussierten Diversifizierung“ z. B. die Solarsparte weiter aus, ZF investiert kräftig in die Produktion für Windkraftgetriebe, Elring Klinger sieht große Chancen in der Medizintechnik. Ziel für diversifizierende Unternehmen ist es, unabhängiger von der Automobilindustrie und ihren konjunkturellen Zyklen zu werden.

Speziell auf Brennstoffzellensysteme bezogen werden nochmals besondere Chancen und Herausforderungen gesehen. Die bisher in kleineren Stückzahlen produzierten Komponenten sind noch sehr kostenintensiv und werden großteils, wie z. B. die aus Kanada importierten Brennstoffzellenstacks, nicht in Baden-Württemberg gefertigt. Trotz vergleichsweise guter Voraussetzungen in Baden-Württemberg ist es jedoch nicht einfach, eine Automotive-fähige Zulieferstruktur aufzubauen, so einer der befragten Experten. „Die Firmen, die das Brennstoffzellen-Thema mit dem nötigen Nachdruck angehen, müssen wir erst noch gewinnen, um dann auch eine möglichst hohe Wertschöpfung hierzulande hinzukriegen. Dafür brauchen wir Automotive-

fähige Zulieferer, also Firmen die die OEM-Ansprüche an Qualität, an Prozesssicherheit und an Logistik erreichen“ (Exp.). Gerade im Bereich Brennstoffzelle sieht auch die Studie „Otto-, Diesel-, Elektromotor – wer macht das Rennen?“, erstellt für die IHK Region Stuttgart, eine große Chance für Baden-Württemberg: Insbesondere wenn sich die Brennstoffzellentechnologie durchsetzen sollte, „würde dies den Automobilstandort Baden-Württemberg sogar stärken, da nach einer jahrzehntelangen Forschungs- und Entwicklungsarbeit in diesem Technologiebereich ein großes Know-how in der Region vorhanden ist“ (Diez & Kohler, 2010, S. 9). Insgesamt zieht diese Studie das Fazit, die Elektrifizierung des Antriebsstrangs sei auf mittlere Sicht keine Bedrohung des Automobilstandorts Baden-Württemberg und der Automobilregion Stuttgart, sondern eine Chance.

8.2 Wandel in der automobilen Wertschöpfungskette

Der Begriff der Wertschöpfung kann als Transformationsprozess verstanden werden, bei dem neue Güter durch Faktorleistungen oder Vorleistungen produziert werden, deren Marktwert die Summe der Marktwerte der Vorleistungen übersteigt (Brunner & Kehrlé, 2009, S. 442). Eine Wertschöpfungskette fasst wiederum sämtliche Akteure und Prozesse zusammen, welche zur Erstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung notwendig sind (Hachtel & Holzbaur, 2010, S. 129). Beschränkte sich in der Vergangenheit diese Definition im Bereich des Automobilbaus auf Prozesse und Güterströme in klassischen Zulieferstrukturen bekannter Partner, arbeiten bspw. durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs Akteure verstärkt aus unterschiedlichen Branchen zusammen. Die klassische pyramidale Struktur innerhalb der Wertekette, bestehend aus Zulieferern unterschiedlicher Stufen (engl. Tier) und dem Automobilhersteller, entwickelt sich zunehmend in Richtung eines Geflechts miteinander verwobenen Netzwerk-Beziehungen.

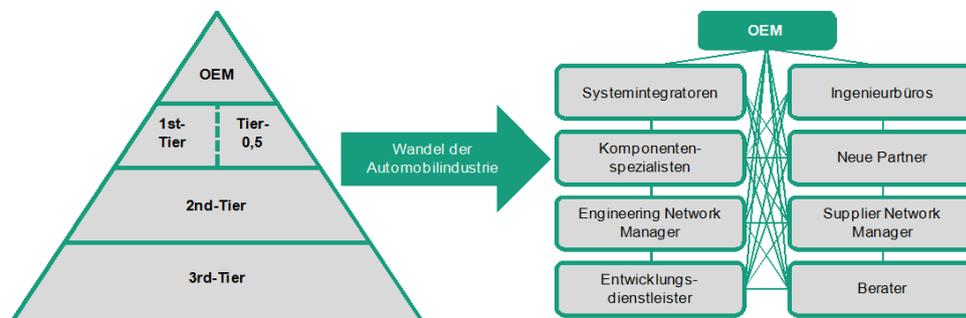


Abbildung 109: Wandel in der Automobil- und Zuliefererindustrie (nach (Schneider, 2011))

Darüber hinaus führt der steigende Variantenreichtum der Antriebskonzepte zu einer Komplexitätserhöhung, währenddessen sich die Stückzahlen wegen der derzeitigen Verbreitung elektromobiler Fahrzeugkonzepte noch im niedrigen Bereich befinden. Um dabei die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens aufrecht zu erhalten, sind alle Teilnehmer der Wertschöpfungsnetzwerke gefordert, ihre Geschäftsprozesse ständig zu optimieren und an die neuartigen Bedürfnisse anzupassen (Krog & Statkevich, 2008).

8.2.1 Kooperationen in der Automobilwirtschaft

Die Herstellung neuer Antriebsstrangkomponenten erfordert Kompetenzen im Bereich der technischen Entwicklung, der Verarbeitbarkeit von Materialien, der Pro-

zessentwicklung und -konzeption, welche in den wenigsten Fällen bereits im Unternehmen in ausreichender Form vorliegen. Geprägt von einer großen Marktunsicherheit sind die OEMs gefordert, ihr Produktportfolio zu planen und umzusetzen. Zur Bündelung von Wissen und zur Absicherung gegenüber finanziellen Risiken werden Strategische Allianzen eingegangen. Diese existieren zwischen den Lieferanten und zwischen Lieferanten und OEMs. Dabei werden diese Kooperationen nicht nur zwischen Unternehmen derselben Branche oder Wertschöpfungsstufe geschlossen. Vielmehr bilden sich Kooperationen mit branchenfremden Marktteilnehmern, wie beispielsweise aus der Chemie- oder Elektronikbranche. Strategische Allianzen sind zweckorientierte Verbindungen zwischen zwei oder mehreren unabhängigen Unternehmen, bei denen durch den Austausch, das Teilen oder die gemeinsame Entwicklung von Ressourcen oder Kompetenzen für alle Seiten nutzenstiftende Ziele erreicht werden sollen (Gulati, 1995, S. 85-112).

Allianzen sind keine neue Erscheinung in der Automobilindustrie. Dennoch erscheinen sie im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs verstärkt, da sich Unternehmen höhere Synergien und einen effektiveren Kompetenzaufbau versprechen.

Bevor konkrete, im ELAB-Projekt relevante Allianzen diskutiert werden, sollen Allianzen grundsätzlich eingeordnet werden. Hierfür soll definiert werden, welche Art von Verbindung den Strategischen Allianzen zugerechnet wird (siehe Abbildung 110: Strategische Allianzen (Kale & Singh, 2009, S. 47)). Außerdem sollen zwischen drei Phasen innerhalb des Allianzprozesses unterschieden und jeweils wichtige Aspekte angemerkt werden.¹

8.2.2 Einordnung des Begriffs der Allianz

Firmenverbindungen können durch Kapital-Vereinbarungen und vertragliche Vereinbarungen entstehen. Bei ersteren kann zwischen drei Fällen (Entstehung eines eigenen Unternehmens, keine Entstehung eines eigenen Unternehmens, Wegfall eines Unternehmens) unterschieden werden.

Bei den vertraglichen Vereinbarungen ist die Unterteilung weniger scharf (traditionelle Verträge, neuartige Partnerschaftsverträge).

Diejenigen Verbindungen, welche im Folgenden Strategische Allianzen genannt werden, sind grau schraffiert. Grob enthalten diese Joint Ventures, Austausch (oder einseitiger Erwerb) von Eigenkapital und die begrenzte gemeinsame Nutzung unternehmerischer Kapazität (z. B. im Forschungs- oder Produktionsbereich).

¹ (Kale & Singh, 2009) liefern eine sehr gute Zusammenfassung aktueller Fragestellungen zum Thema Allianzen. Auf diese wird im Folgenden Bezug genommen.



Wertschöpfungskette,
Branchenumfeld,
Strategische Allianzen

Abbildung 110: Strategische Allianzen

8.2.3 Phasen einer Strategischen Allianz

Die drei Phasen einer Allianz sind die Entstehung, die Reglementierung und die Steuerung (bzw. Management).



Abbildung 111: Phasen einer Allianz

In der Entstehungsphase geht es hauptsächlich um das Finden eines passenden Partners. Ein entscheidendes Kriterium ist die Komplementarität. So lassen sich Synergieeffekte dann erzielen, wenn die Allianzteilnehmer Kompetenzen, Ressourcen und Wissen einbringen können, von denen die Partner profitieren und über die die Partner noch nicht selbst verfügen (Dyer & Singh, 1998, S. 660-679). Ebenso muss zwischen den Partnern eine Kompatibilität sichergestellt werden. Häufig kommt es beispielsweise zu interkulturellen Konflikten und zu Konflikten von Unternehmenskulturen. Konfligierende Kulturen (in der Makro- oder auf Unternehmensebene) können nicht überbrückbare Hindernisse bei einer Strategischen Allianz darstellen: Kompatibilität ist nicht erzwingbar. Die (Selbst-)Verpflichtung der Allianzpartner stellt die dritte Herausforderung in der Entstehungsphase dar. Diese kann im einfachsten Fall durch Vertragsstrafen garantiert werden. Falls diese nicht darstellbar sind, können durchgeführte Investitionen (beispielsweise in eine gemeinsam betriebene Einrichtung) die Selbstverpflichtung beweisen. Alternativ können Allianzen inhärent stabil sein, wenn für alle beteiligten

Parteien ein Scheitern mit hohen Kosten oder sonstigen Einbußen einherginge. In diesem Fall stellt die stabile Allianz ein Nash-Gleichgewicht dar¹.

Nachdem in der Entstehungsphase ein oder mehrere Projektpartner identifiziert wurden, müssen mit diesen für eine erfolgreiche Allianz Regeln gesetzt werden. Um Opportunismus und das Ausnutzen von Partnern zu verhindern, kann ein Austausch von Kapital erfolgen. Durch diesen Schritt würden alle Allianzteile Verluste erleiden, wenn das gemeinsame Unterfangen scheitert. Auf der anderen Seite sind sie auch an anfallenden Gewinnen beteiligt. Neben dem Kapitaltausch können dedizierte (Gesellschafts-)Verträge dabei helfen, Verantwortlichkeiten klarzustellen und Tätigkeitsbereiche abzustecken. Außerdem können kritische Fragen der Geheimhaltung und der Vertragsstrafen geklärt werden. Unterschätzt wird in Strategischen Allianzen häufig der Vertrauensfaktor, der sich nicht vertraglich regeln lässt. Dies ist insbesondere bei länderübergreifenden Verbänden der Fall, wenn Vertrauensbasen unterschiedlich aufgebaut werden. Ist letztendlich Vertrauen aufgebaut, können Vertragskosten und Überwachungskosten gespart werden.

Die Steuerung der Strategischen Allianz sollte sich im Idealfall durch die definierten Regeln ergeben. Um das gegenseitige Vertrauen zu stärken, können sich die Allianzpartner bewusst in Abhängigkeitssituationen begeben, um durch Angreifbarkeit ihre Selbstverpflichtung zu untermauern. Daneben sollten häufige Treffen der Entscheider institutionalisiert werden, damit zwischenmenschliches Vertrauen aufgebaut und implizites Wissen ausgetauscht werden kann.

8.2.4 Sonstige Unternehmensbeziehungen

Wie in Abbildung 110: Strategische Allianzen erkennbar, existieren neben Strategischen Allianzen noch weitere Verbindungen zwischen Unternehmen; insbesondere die Lieferbeziehung. Es soll in den folgenden Kapiteln auch auf relevante Lieferbeziehungen abgestellt werden. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wurde eine Auswahl von Automobilherstellern untersucht. Außerdem besteht ein Fokus auf *aktuelle* Lieferbeziehungen und Kooperationen.

In Kapitel 8.3 sollen Lieferbeziehungen und Allianzen für die im ELAB-Projekt maßgeblichen Komponenten Batterie, Elektromotor, Leistungselektronik und Brennstoffzelle aufgezeigt werden.

Die Abbildungen in Kapitel 8.3 zeigen Übersichten von Unternehmensbeziehungen. Dabei sind die Strategischen Allianzen durch schwarze Verbindungen gekennzeichnet. Reine Lieferbeziehungen wurden blau markiert. Sofern die Beziehungen erkennbar auf bestimmte Unterkomponenten (z.B. Batteriezellen oder Batteriesystem) bezogen sind, wurde dies angemerkt. Besteht von einem OEM aus gesehen keine Kooperation, jedoch Lieferbeziehungen, ist von Fremdbezug der Komponente auszugehen. Bestehen weder Lieferbeziehungen noch Kooperationen, fertigt dieser selbst.

Alle Abbildungen in Kapitel 8.3 sind auf dem Stand Dezember 2011.

¹ Nash-Gleichgewichte sind ein Konzept der Spieltheorie und entstehen dann, wenn eine Entscheidungskombination für alle Entscheider zufriedenstellend ist unter dem Aspekt, dass sich ein einseitiges Ausscheiden nicht lohnen würde.

8.3 Unternehmensbeziehungen bei betrachteten Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs

8.3.1 Batteriesystem

Die Batterie ist die Kernkomponente bei der Elektrifizierung des Antriebsstranges. Der Energiespeicher besitzt den höchsten Wertschöpfungsanteil am Elektrofahrzeug und bestimmt maßgeblich die Leistungsfähigkeit als auch die Reichweite des Automobils. Allein der Anteil der Batterie an den Herstellkosten beträgt je nach Fahrzeugklasse rund 50 – 65 % (Spath, et al., 2011).

Bei der Herstellung der Batterien wird eine Unterscheidung zwischen der Herstellung von Batteriezellen und Batteriesystem getroffen, da diese Komponenten häufig von verschiedenen Systempartnern in der Wertschöpfungskette produziert werden. Erster Schritt der Erzeugung der Batterien ist die Fertigung der Batteriezellen, die für den Einsatz im Fahrzeug im zweiten Schritt zu Batteriesystemen zusammengefasst werden. Hierzu werden mehrere Einzelzellen zu einem Modul verbunden. Diese Module werden anschließend in ein Gesamtsystem gebündelt, um die Kapazität zu erhöhen. Neben den Zellmodulen umfasst ein gesamtes Batteriesystem auch noch Komponenten zum elektronischen, elektrischen, thermischen und mechanischen Zusammenschluss.

Aus unterschiedlichen Zelltypen leiten sich unterschiedliche Anforderungen an das Gesamtsystem ab, beispielsweise hinsichtlich Kühlung und Packaging. Dies hat direkten Einfluss auf die Komplexität und die Gesamtkosten des Systems. Es ist daher notwendig, die Batterie als Gesamtsystem zu verstehen und entsprechend nicht nur einzelne Komponenten zu verbessern, um eine Systemverbesserung zu erreichen, sondern eine systemische Optimierung zu betreiben.

Generell lässt sich sagen, dass die Traktionsbatterie technisch noch nicht ausgereift ist. Doch Experten erwarten aufgrund der verstärkten Forschung und Entwicklung im Bereich der Zellchemie Fortschritte bei der Technologie und hohe Kostensenkungspotenziale.

Gerade aufgrund des hohen Entwicklungsbedarfs lässt sich in der Batterietechnik eine hohe Dynamik bei Strategischen Allianzen beobachten. Ebenfalls bestehen viele Lieferbeziehungen.

Deutsche Hersteller sind hier im internationalen Vergleich in einer Verfolgerposition. Während Automobilunternehmen aus Japan schon seit Jahren mit dortigen Batteriespezialisten kooperieren und daher von diesen bevorzugt behandelt werden, kümmern sich Volkswagen und andere erst seit kurzem um ähnliche Bindungen.

Beispielsweise hat Daimler mit den Gemeinschaftsunternehmen Deutsche Accumotive (Batteriesystemebene) und Li-Tec (Batteriezellebene) die Partnerschaft mit Evonik gesucht. Daimler verfährt hier somit nach den japanischen Vorbildern, die sich hauptsächlich innerhalb nationaler Grenzen Kooperationen erschlossen haben. Allerdings fixiert sich Daimler nicht, wie bei den japanischen Herstellern meist der Fall, auf eine dominierende Kooperation. In einer Zusammenarbeit mit Continental wurden Li-Ion-Akkus in Mercedes-PKWs integriert. Von Tesla bezog Daimler ebenfalls Batteriepakete für die Elektro-Smarts. Außerdem kommen die Batterien einer Testflotte von A-Klasse-BEV von Tesla.

Zudem unterhält Daimler eine weitere Kooperation mit Renault-Nissan. Die Partner gingen eine Überkreuzbeteiligung von 3,1 % ein. Teil der Vereinbarung ist, dass Daimler über Tochterfirmen Batterien für die elektrische Version des Renault Twingos und für den Nissan Leaf entwickelt und produziert. Im Gegenzug liefert Renault

die Elektromotoren für den Smart. Renault-Nissan selbst arbeitet auf Batterieebene zusammen, wobei die Allianz primär komponentenübergreifend ausgerichtet ist. Volkswagen hat mit Varta eine gemeinsame Forschung vereinbart. Überdies hat der Wolfsburger Konzern Kooperationen mit Toshiba und Panasonic. Auch BMW hat eine Kern-Kooperation mit dem französischen Konzern PSA (BMW Peugeot Citroen Electrification). Zusätzlich sind Lieferverbindungen mit SB LiMotive und Continental vorhanden.

Darüber hinaus entstehen auf Zuliefererebene Allianzen auf der gleichen Stufe der Lieferkette.

Bosch und Samsung verfolgen mit ihrem Gemeinschaftsunternehmen SB LiMotive das Ziel, Li-Ionen-Batterien für sämtliche Anwendungen in der Automobilbranche (Micro-Hybrid bis reines Elektrofahrzeug) zu liefern. Continental arbeitet mit der japanischen Firma Enax an Batterien für Hybrid-Antriebe und hat beispielsweise Mercedes-Benz mit diesen beliefert. Überdies gibt es Kooperationen kleinerer Batteriespezialisten wie zwischen Boston Power und der deutschen BMZ. Bei diesen Kooperationen sind die Ziele ähnlich wie bei den großen Zulieferern und Herstellern: Synergien und reziproker Kompetenzaufbau. Außerdem können durch gemeinsame Produktionskapazitäten (sofern bei allen Partnern vorhanden) größere Fixkostendegressionen erreicht werden¹.

¹ Anmerkung zu Abbildung 112: Batterie-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO): Continental ist doppelt vorhanden, da die Beziehungen mit einem Feld für Continental nicht darstellbar waren, ohne andere Verbindungen unkenntlich zu machen.

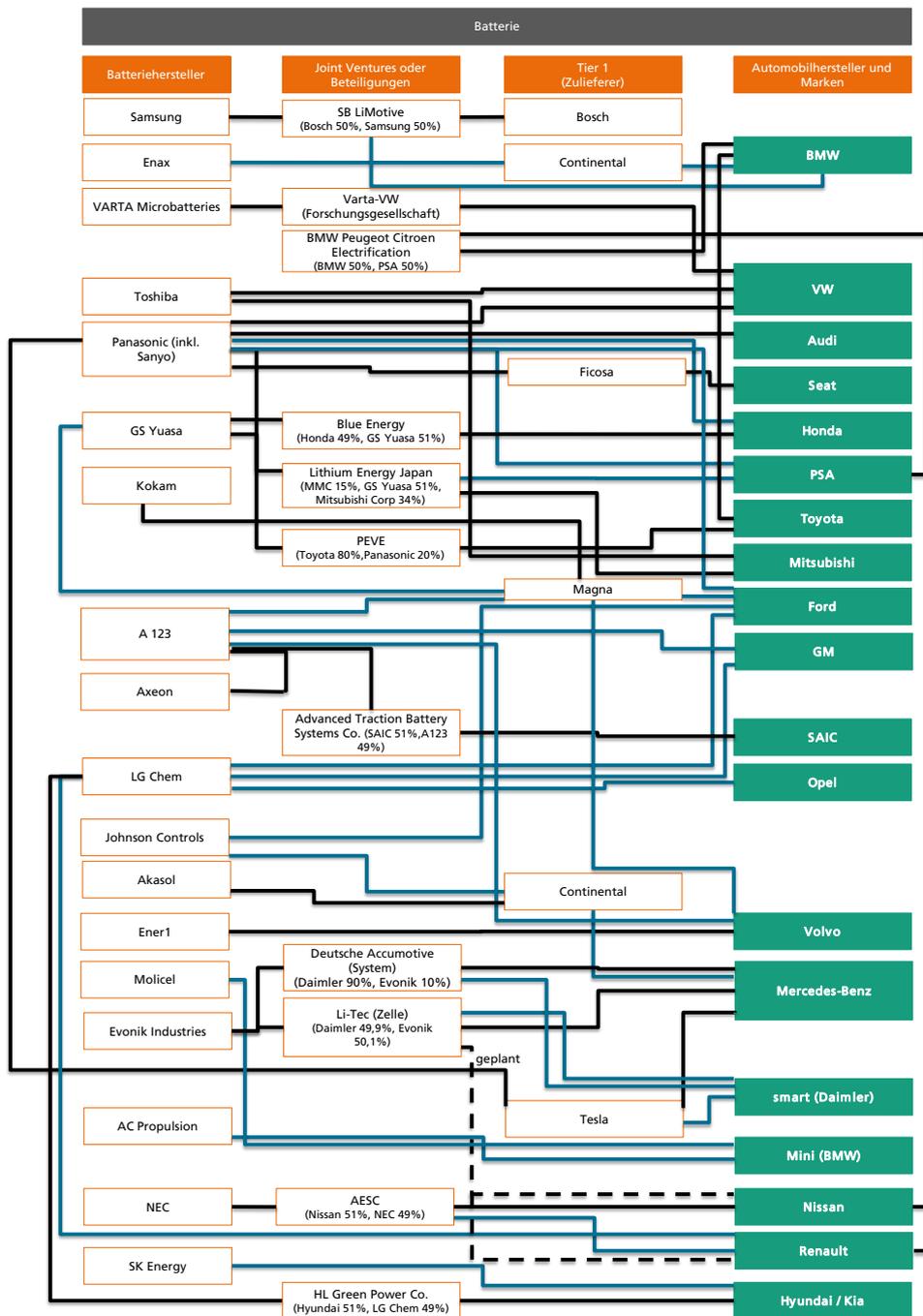


Abbildung 112: Batterie-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO)

8.3.2 Elektromotor

Zwar wird der Batterietechnik die höchste Wertschöpfung im Elektroauto zugeschrieben. Dennoch ergeben sich bei anderen Komponenten des Elektrofahrzeugs auch neue Herausforderungen, denen sich die beteiligten Unternehmen durch Strategische Allianzen stellen.

Der Elektromotor stellt das Pendant zum konventionellen Verbrennungsmotor dar. Dabei ist die elektrische Maschine als Antriebsquelle im Fahrzeug hervorragend ge-

eignet. Beim Mild-Hybrid wird der Elektromotor zur Verbesserung des Wirkungsgrades von Verbrennungskraftmaschinen im Teillastbereich eingesetzt. Bei den anderen elektrischen Konzepten (wie REX, BEV, FC), kann das Fahrzeug allein über die elektrische Maschine angetrieben werden. Dabei werden sehr hohe Wirkungsgrade (bis zu 95 Prozent) erreicht. Zwei weitere große Vorteile sind, dass das maximale Drehmoment bereits beim Anfahren ab Tempo 0 km/h zur Verfügung steht und dass Energie beim Bremsvorgang über Rekuperation an die Batterie zurückgespeist werden kann. Auf eine Kupplung beim Elektromotor kann verzichtet werden, es wird nur ein Übersetzungsgetriebe benötigt. Aufgrund der geringen Baugröße besitzt der Elektromotor eine höhere Flexibilität bei der räumlichen Anordnung und Anbindung. So ergeben sich Potenziale für neue Konzepte wie beispielsweise Radnabenmotoren.

Beim Elektromotor ist die Allianz zwischen Daimler und Bosch zu nennen. Die beiden Unternehmen wollen gemeinsam Elektromotoren entwickeln und diese ab 2012 produzieren. Dieser Partnerschaft wird ein exemplarischer Stellenwert zugeschrieben, da der Motor – die bisherige OEM-Kernkompetenz – mit einem Zulieferer erstellt wird. Laut Bain & Company zeigt dieses Beispiel, "wie sich in der Elektromobilität die klassischen Stufen der Wertschöpfungsketten verschieben" (Matthies, 2011). Die gefertigten Motoren werden in Mercedes-Benz- und Smart-Modellen zum Einsatz kommen. Allerdings wird Bosch diese auch an andere OEMs verkaufen dürfen. Daneben bezieht Daimler für den Citaro-Hybridbus Elektromotorkomponenten von ZF. Deren Elektro-Smarts haben Zytec-Motoren.

Eine weitere Allianz besteht zwischen Siemens und Volvo. Diese erstreckt sich über die Entwicklung und Herstellung von Elektromotoren. Außerdem soll an der Lade-technik sowie der Leistungselektronik gearbeitet werden. Zu beachten ist, dass die Volvo Car Corporation seit 2010 zum chinesischen Hersteller Geely gehört. Auch hier wird von Experten angemerkt, dass Autobauer Gefahr laufen, ihre dominante Stellung in der Wertschöpfungskette zu verlieren.

BMW und Peugeot haben, wie angemerkt, ihre schon seit Jahren existierende Zusammenarbeit mit der Gründung eines Joint Ventures („BMW Peugeot Citroën Electrification“) manifestiert. Das Gemeinschaftsunternehmen wird neben Hybrid-elektromotoren auch weitere Hybridkomponenten (inklusive Leistungselektronik) entwickeln und produzieren. Insbesondere BMW soll von dieser Allianz profitieren, da es zuvor über geringe Kompetenz beim Hybridfahrzeug verfügte.

Der Zulieferer Magna hat dagegen mit der Magna E-Car Systems ein besonderes Gemeinschaftsunternehmen geschaffen, da dieses über die Stronach Gruppe „mit sich selbst“ kooperiert. Zuvor hatte Magna durch die Übernahme der BluWav Systems fachliche Kompetenz in den Bereichen Hybridfahrzeugsystemen und batterie-elektrischen Fahrzeugen akquiriert. Magna E-Car Systems entwickelt den elektrischen Antrieb für den Ford Focus Electric. Überdies will Magna mit Brusa Elektronik im Elektro- und Hybridfahrzeugbereich zusammenarbeiten.

Bei der Zusammenarbeit von Toyota und Tesla will Toyota die Elektroantriebskompetenz von Tesla für die eigene Produktpalette nutzen. Grundsätzlich plant Toyota – wie die meisten großen Hersteller (u.a. VW, Nissan, Honda, GM) – jedoch, die Entwicklung und die Produktion des Elektromotors intern durchzuführen.

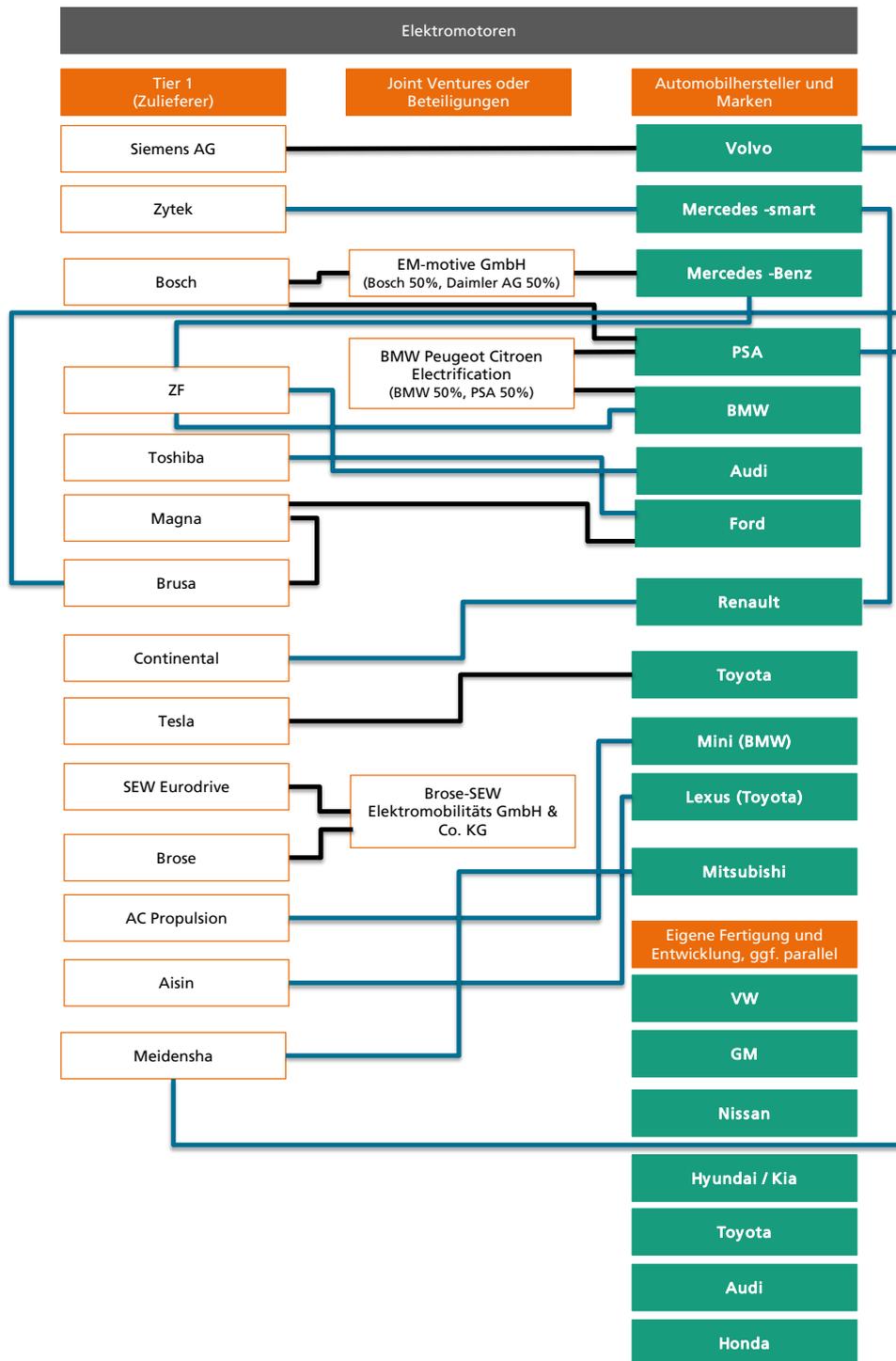


Abbildung 113: Elektromotor-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO)

8.3.3 Leistungselektronik

Der Leistungselektronik kommt mit der Elektrifizierung des Antriebsstranges eine immer größer werdende Bedeutung zu. Dabei übernimmt die Leistungselektronik die Steuerung und Schaltung der elektrischen Verbraucher und ermöglicht somit den Energiefluss im Fahrzeug.

Die Aufgabe des Leistungselektronikmoduls ist es, die Spannungen und Frequenzen auf das für den elektrischen Verbraucher passende Niveau umzuwandeln. Dazu werden Wechselrichter und Gleichspannungswandler verwendet.

Neben der Regelung des Antriebs muss auch die Rekuperation bzw. der Ladevorgang sowie Spannungswandlung innerhalb des Bordnetzes über die Leistungselektronik dargestellt werden.

Die Leistungselektronik stellt damit eine bedeutende Komponenten mit Einfluss auf Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Hybrid- und Elektrofahrzeugs dar.

Bei der Konzeption der Leistungselektronik müssen die Kosten, Verfügbarkeit, Performance, Gewicht und Package des Systems so gut wie möglich gemeinsam optimiert werden, um zu einem für die jeweiligen Anforderungen optimalen Ergebnis zu kommen.

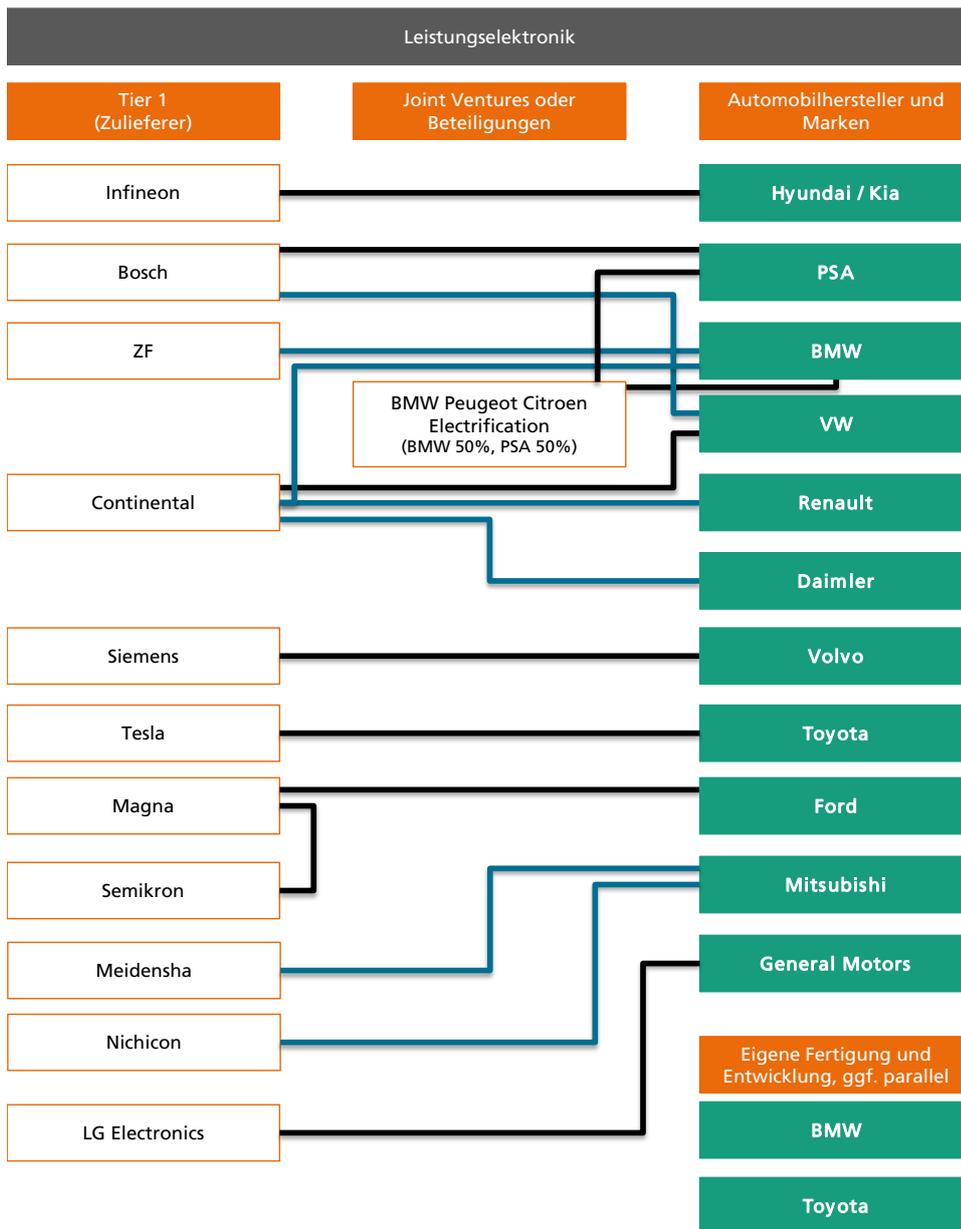
Bei der Leistungselektronik nutzt BMW Eigen- und Fremdbezug parallel. Für das Megacity Vehicle soll die Leistungselektronik selbst entwickelt werden, währenddessen ZF für Hybridfahrzeuge als Zulieferer fungiert. Für BMWs Konzept-Auto Vision EfficientDynamics kam Continental zum Zug. Außerdem arbeiten BMW und PSA auch im Bereich der Leistungselektronik zusammen. Daimler wird für den S400 Hybrid von Continental beliefert. Volkswagen erhält Leistungselektronik für den Touareg von Bosch. Mit Continental hat VW jedoch eine strategische Partnerschaft für zukünftige Hybrid-Leistungselektronik vereinbart.

Siemens arbeitet, wie beim Elektromotor, auch in Bezug auf Leistungselektronik mit Volvo zusammen. Das Modell C30 Electric soll mit gemeinsam entwickelten Komponenten ausgestattet werden.

Infineon kooperiert mit Hyundai seit 2007 in einem gemeinsamen Innovationszentrum. Dabei soll Infineon seine Erfahrung in der Entwicklung von Halbleitern für die Automobilindustrie einbringen. Hyundai steuert Kompetenz in der Erstellung von Systemarchitekturen bei. Es sollen unter anderem elektronische Systemarchitekturen sowie Steuereinheiten und integrierte Schaltungen entwickelt werden. Erste gemeinsam designte Komponenten kommen in den Hybridfahrzeugen von Hyundai und Kia zum Einsatz.

PSA und Bosch arbeiten zusammen an der Hybridtechnologie. So soll Bosch die Antriebselektronik sowie Elektromotoren für den Hybridantriebsstrang relevanter Modelle von Peugeot und Citroen entwickeln und produzieren. Die Fokussierung auf ein Partnerunternehmen sollte PSA dabei helfen, die Markteinführung von Diesel-Hybridfahrzeuge zu beschleunigen (seit Februar 2011 allerdings neue Allianz zwischen PSA und BMW auf ähnlichem Gebiet).

Im Mitsubishi iMiev stecken Leistungselektronik-Teile von den japanischen Firmen Meidensha und Nichicon. Toyota profitiert im Rahmen seiner Partnerschaft mit Tesla auch von deren Expertise bei der Leistungselektronik in reinen Elektrofahrzeugen. Die Leistungselektronik von Hybridfahrzeugen entwickelt und fertigt Toyota selbst.



Wertschöpfungskette,
Branchenumfeld,
Strategische Allianzen

Abbildung 114: Leistungselektronik-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO)

8.3.4 Brennstoffzelle

Brennstoffzellenfahrzeuge werden, verglichen mit Batterie-Elektrofahrzeugen und Elektro-Hybriden, von weniger Herstellern forciert. Dennoch wurde diese Technologie mehrfach in Test- und Konzeptfahrzeugen genutzt. Für Mobilitätsanwendungen sind die sog. Niedertemperaturbrennstoffzellen (PEMFC) von hoher Relevanz. Niedrige Temperaturen bedeuten hier 60° - 120°C. Ein großer Vorteil der Brennstoffzellentechnologie liegt in den nicht schädlichen Abgasen. Endprodukt der chemischen Reaktionen ist Wasser. Im Vergleich zu anderen Fahrzeugkonzepten ist das Brennstoffzellenfahrzeug komplex, da insbesondere die Leistungselektronik zusätzliche Komponenten enthält (DC/AC-Wandler und DC/DC-Wandler nötig). Außerdem

muss ein betriebssicherer Wasserstoffdrucktank verbaut werden. Weiterhin stellt die hohe Wärmeentwicklung für die Produktion von Brennstoffzellenfahrzeugen eine Herausforderung dar.

In Deutschland ist Daimler der OEM, der die Brennstoffzellentechnologie am stärksten vorantreibt. So möchte Daimler zusammen mit Linde ein Netzwerk für Brennstoffzellenfahrzeuge aufbauen. Daher wurde die Firma NuCellSys (2005 zusammen mit Ford gegründet) im Jahr 2009 eine Tochtergesellschaft von Daimler. Außerdem ist Daimler im Rahmen der Automotive Fuel Cell Cooperation mit Ford und Ballard in Partnerschaft.

Der PSA-Konzern ist mit der französischen Atomenergiekommission (CEA) alliiert. Zusammen werden moderne Brennstoffzellen entwickelt. Bei anderen Modellen (Peugeot Partner H2Origin) besteht eine Partnerschaft mit Intelligent Energy. Ziel dieser Kooperation ist die Integration einer Brennstoffzelle als Range Extender.

BMW hat 2009 seine Feldversuche mit Brennstoffzellenfahrzeugen gestoppt. Diese Fahrzeuge waren mit Brennstoffzellen von UTC Power bestückt. Volkswagen wurde in sehr frühen Versuchen mit Ballard-Brennstoffzellen beliefert. Seit 2007 wird die Weiterentwicklung im eigenen Hause durchgeführt. Toyota, GM, Hyundai und Honda nutzen ebenfalls Eigenentwicklungen.

Neben im Rahmen des ELAB-Projekts betrachteten Beziehungen der OEM und Zulieferer gibt es übergeordnete Initiativen zur Förderung der Brennstoffzelle. Hervorzuheben ist hierbei die Clean Energy Partnership (CEP). 15 Partner (BMW, Daimler, Ford, VW, Toyota, Linde, Shell, Statoil und weitere) erproben die Systemfähigkeit von Wasserstoff im täglichen Einsatz in einem Demonstrationsprojekt. Dazu zählen nicht nur der kontinuierliche Betrieb leistungsfähiger Wasserstofffahrzeuge und deren schnelle und sichere Betankung. Die CEP kümmert sich ebenso um die saubere und nachhaltige Erzeugung von Wasserstoff, um den Wasserstofftransport und die Speicherung von H₂ im flüssigen und im gasförmigen Zustand. Hervorgegangen aus der „Verkehrswirtschaftlichen Energiestrategie“ (VES) wurde die CEP im Dezember 2002 als gemeinsame Initiative von Politik und Industrie unter Federführung des Bundesverkehrsministeriums etabliert (Clean Energy Partnership, 2011). Außerdem soll in der Industrieinitiative H₂ Mobility der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland intensiviert werden. Die Unternehmen Daimler, Linde, EnBW, OMV, Shell, Total und Vattenfall arbeiten hierbei mit der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) zusammen. Neben des Aufbaus der Wasserstofftankstelleninfrastruktur sollen für die Beteiligten profitable Geschäftsmodelle entwickelt und in einer späteren Phase umgesetzt werden (The Linde Group, 2011).

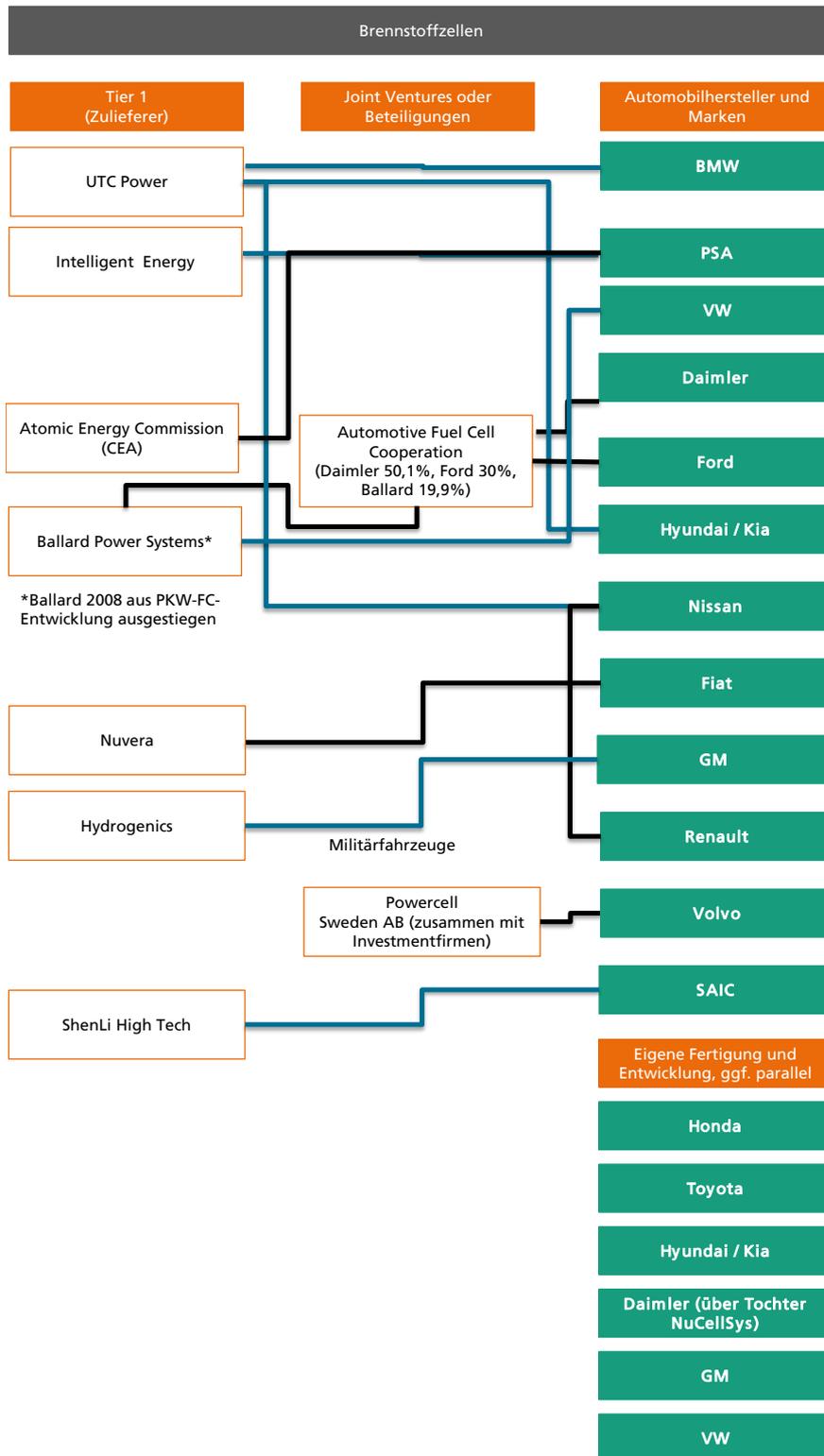


Abbildung 115: Brennstoffzelle-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO)

8.3.5 Alternative Strategien zur Allianzbildung

Die bisher vorgestellten Strategischen Allianzen waren und sind privatwirtschaftlich initiiert. In Ländern mit alternativer Wirtschaftsstruktur (insb. China) können Allianzen staatlich angeordnet werden. So hat die Regierung in Peking angekündigt, eine nationale Allianz (Electric Vehicle Industry Alliance (People's Daily Online, 2010)) über die gesamte Wertkette der Elektromobilität zu formen.

Diese soll von einer staatlichen Stelle koordiniert werden (State-owned Assets Supervision and Administrative Commission of the State Council, SASAC). Bis Ende 2012 sollen die bisher 16 Teilunternehmen umgerechnet (1€ = 8,8 RMB) ca. 11,4 Mrd. € in die Allianz einbringen (CNTV, 2010).

Solch konzertierte Aktionen sind in westlichen Demokratien kaum vorstellbar. Sie stellen jedoch durch ihre finanzielle Schlagkraft und zu erwartende Bevorzugung seitens der Regierung einen erheblichen Wettbewerbsfaktor auf dem chinesischen Markt dar. Langfristig soll die Allianz international wettbewerbsfähig werden.

Abbildung 116 zeigt die bisherigen Mitglieder der Electric Vehicle Industry Alliance sowie ein potentiell neues Mitglied (BAIC).

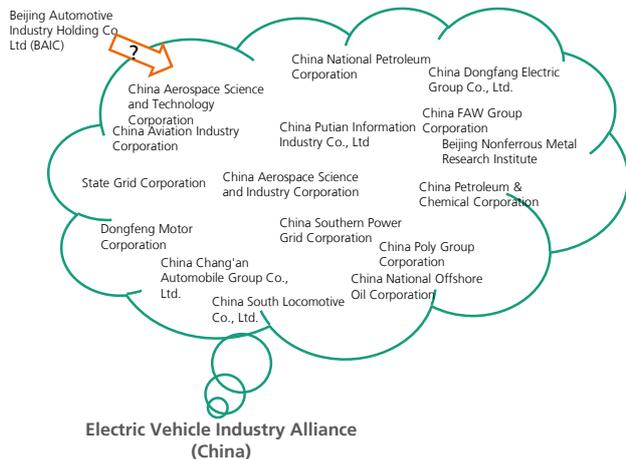


Abbildung 116: Electric Vehicle Industry Alliance

8.3.6 Auswertung und Fazit

Vor allem bei Betrachtung des Beziehungsgeflechts bezüglich der Batterie lässt sich erkennen, dass europäische, amerikanische und asiatische OEMs andere Bezugs- und Kooperationsstrategien verfolgen.

Gerade die deutschen Hersteller betreiben eine mehrgleisige Politik. Volkswagen arbeitet in drei Allianzen, BMW ist in einer Allianz vertreten und hat zwei sonstige Bezugsquellen (zwei weitere Lieferanten über Mini) und Daimler ist über Mercedes-Benz und Smart ebenfalls an drei Kooperationen beteiligt.

Dieser breite Ansatz dürfte darauf abzielen, den Wettbewerb unter den Zulieferern zu fördern. Außerdem zeugt er von einer Marktbetrachtung, die die OEMs ins Zentrum stellt.

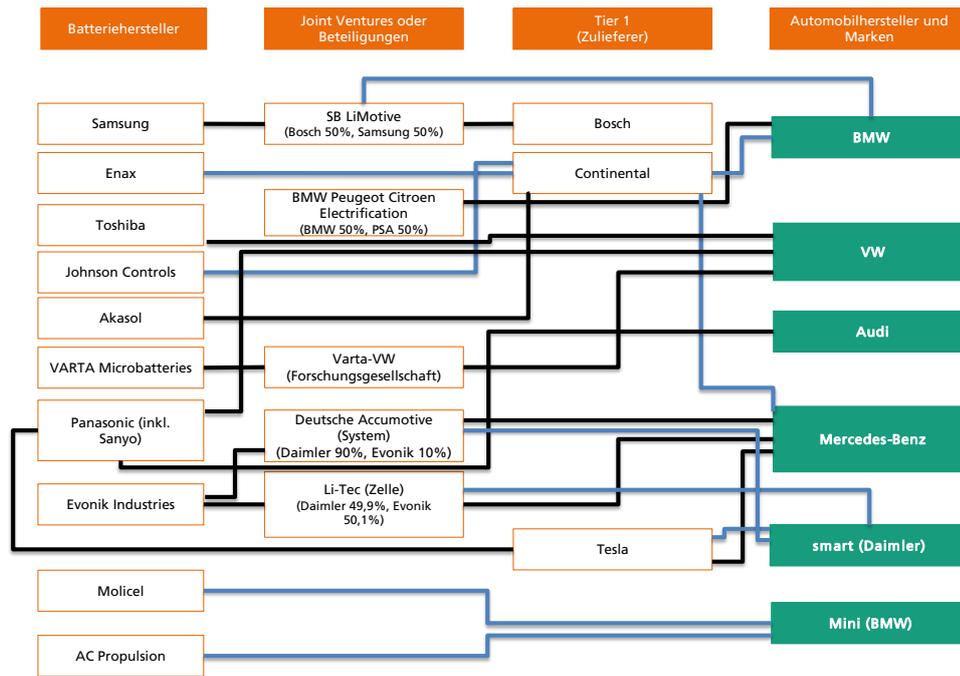


Abbildung 117: Beziehungen deutscher Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Dagegen konzentrieren sich japanische OEMs auf weniger Verbindungen. Honda hat eine Kooperation mit GS Yuasa und eine Lieferbeziehung mit Panasonic. Toyota arbeitet eng mit Panasonic zusammen. Nissan ist zusammen mit NEC am Gemeinschaftsunternehmen AESC beteiligt.

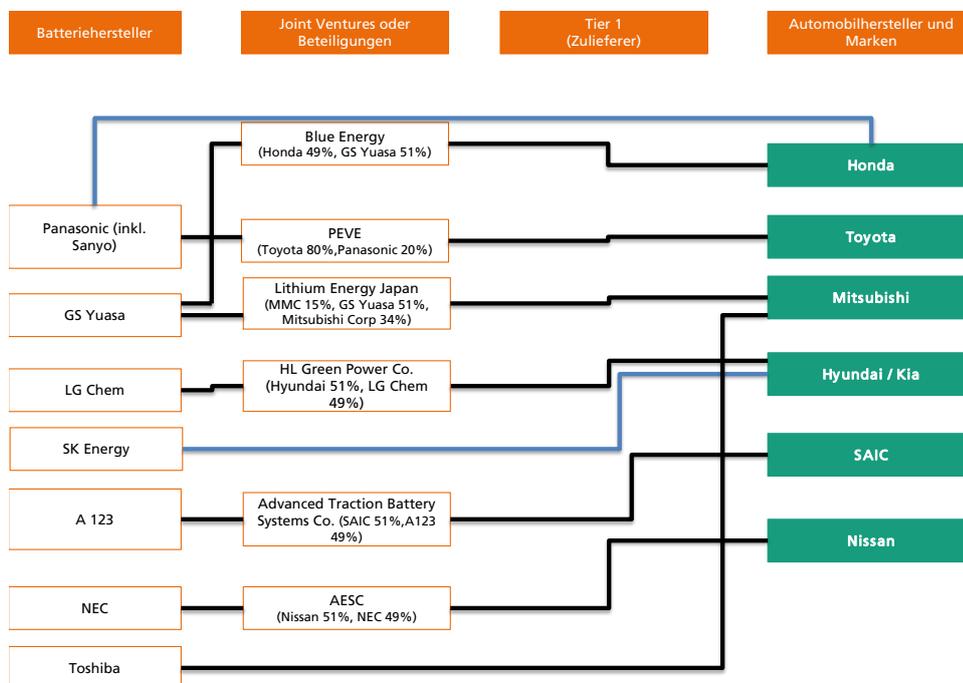


Abbildung 118: Beziehungen asiatischer Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Die japanischen Firmen bleiben also meist unter sich. Dies ist für die dortige Wirtschaft typisch: Große Konglomerate („Keiretsu“) sind vertikal stark integriert und überdies noch eng mit anderen Firmen verbunden. Bekannte Keiretsu sind Toyota, Nissan und Honda. Tabelle 16 beschreibt die allgemeinen Vor- und Nachteile dieser eng verknüpften Wirtschaftsstruktur. Von den Vorteilen profitieren die Firmen im Zentrum des Keiretsu stärker als die Peripherie. Der Hauptnachteil besteht in der Innenorientierung (McGuire & Dow, 2009, S. 333-351).

Vorteile
Risikoreduktion und Leistungs nivellierung
Gegenseitige Überwachung
Reduktion von Informationsasymmetrien
Gegenseitige Unterstützung
Zugriff zu sicheren Finanzierungsleistungen
Schutz vor Marktdruck
Nachteile
Höhere Darlehenskosten
Überinvestitionen
Suboptimale Unternehmensleistungen
Erhöhte Informationsasymmetrie (zwischen Keiretsu-Insidern und – Outsidern)

Tabelle 16: Vor- und Nachteile Keiretsu

Die koreanische Wirtschaft ist in ähnliche Konglomerate strukturiert („Chaebol“). Daher sind dortige Automobilhersteller auch hauptsächlich mit einheimischen Herstellern verbunden; allerdings nicht so durchgehend wie in Japan (z.B. SB LiMotive mit Bosch und Samsung).

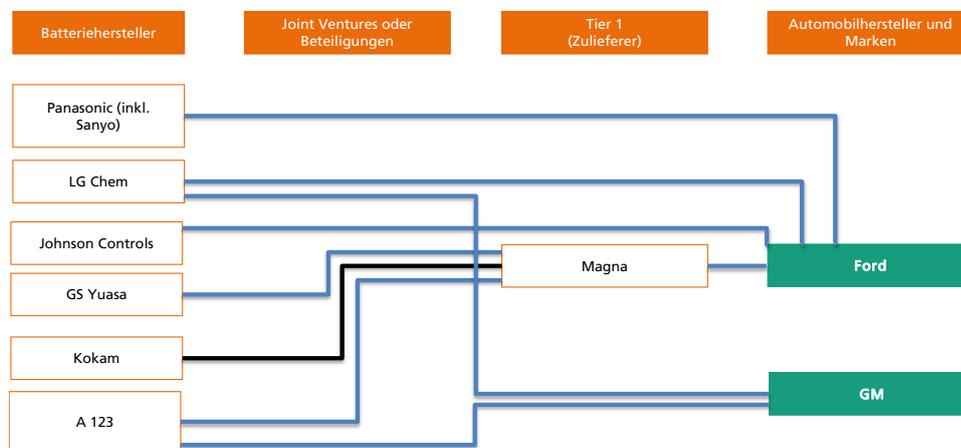


Abbildung 119: Beziehungen amerikanischer Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)

Amerikanische OEMs verfolgen eine Strategie, die sich durch vielfältige Liefervereinbarungen auszeichnet. Ford unterhält hierbei Beziehungen zu Panasonic, Magna, Johnson Controls und LG Chem. GM wird von A123 und LG Chem beliefert. Beide Unternehmen sind im Batteriesektor keine Kooperation eingegangen. Außerdem sind die Verbindungen, ähnlich wie bei den europäischen Herstellern, nicht an nationale Grenzen geknüpft. Die im Vergleich zu Japan libertäre Wirtschaftsordnung der USA hat andere Zielvorstellungen: Während in Japan (und zu einem geringeren Grad in Kontinentaleuropa) das Wohl der Gesamtwirtschaft im Vordergrund steht, ist der

Fokus der amerikanischen Ordnung das Wohl des Einzelunternehmens. Staatliche Eingriffe in die Unternehmenspraxis (z.B. wie das Setzen übergeordneter Ziele) werden kritisch betrachtet. Außerdem werden Unternehmenszusammenschlüsse in den USA traditionell kritischer von den Aufsichtsbehörden gesehen, da auf eine wettbewerbsintensive Marktstruktur großer Wert gelegt wird (Fox, S. 347-348). Daher sind Konglomerate wie in Japan nicht vorstellbar.

Bei der Entwicklung und Produktion des Elektromotors ist die Mehrheit der umsatzmäßig größten Automobilhersteller länderunabhängig daran interessiert, die Komponente im Haus zu behalten (u.a. VW, GM, Toyota, Honda, Nissan). Daimler ist dagegen eine langfristige angelegte Kooperation mit Bosch eingegangen.

Die Zusammenarbeit bei der Leistungselektronik ist begrenzt. Die Dynamik liegt zwischen jener der Elektromotoren und der Brennstoffzellen. Es fällt auf, dass Bosch und Continental zentrale Zulieferer sind.

Hinsichtlich der Brennstoffzelle ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Elektromotoren, wenngleich auf diesem Markt noch eine geringere Dynamik festzustellen ist. Die einzige prägnante Kooperation besteht zwischen Daimler, Ford und Ballard Power Systems (Automotive Fuel Cell Corporation).

Die Beziehungslandschaft bei den Batteriesystemen ist von hoher Dynamik geprägt. Neue Kooperationen entstehen monatlich. Diese sind – bis auf Allianzen in Asien – basierend auf historischen Erfahrungswerten häufig nicht von Dauer. Deutsche Hersteller versprechen sich durch die verstärkte Zusammenarbeit Synergieeffekte und Wissenstransfer. Eine Interpretationsmöglichkeit ist, dass die langfristigen japanischen Allianzen zum Vorbild genommen wurden und sich die deutschen OEMs noch in der Findungsphase befinden. Außerdem liegt ein anderes Marktverständnis vor. Deutsche Hersteller erhoffen sich durch parallele Zusammenarbeit und vielfältige Lieferbeziehungen verstärkten Wettbewerb der Zulieferer und wollen in keine Abhängigkeitsposition geraten. Die Vielfalt der Beziehungen bei den Batterien spiegelt – verglichen mit den Komponenten Brennstoffzelle, Elektromotor und Leistungselektronik – die strategische Signifikanz dieser Komponente in den Augen der Hersteller wider.

8.3.7 Implikationen

Im Kapitel 5 wurde dargestellt, dass die Herstellung neuer Komponenten für den elektrifizierten Antriebsstrang zukünftig Arbeitsplatzpotentiale birgt. Die Ergebnisse des Kapitels 8.3 zeigen in diesem Zusammenhang auf, dass erhebliche Unsicherheit besteht, in welcher Form und in welchen Weltregionen diese Arbeitsplätze angesiedelt sein werden.

Zur Bündelung von Wissen und zur Absicherung gegenüber finanziellen Risiken werden Strategische Allianzen eingegangen. Aus den Analysen zu den Unternehmenskooperationen und Lieferbeziehungen geht hervor, dass die Aufteilung der Mitarbeiter auf Zulieferer und OEMs vom Grad der Beziehungsintensität abhängt:

- Hohe Beziehungsintensität: Die OEMs unterhalten viele Beziehungen zu Vorleistern, was zu einer tendenziell stärkeren Verschiebung von Arbeitsplätzen zu den Vorleistern führt
- Geringe Beziehungsintensität: Die OEMs unterhalten wenig Beziehungen zu Vorleistern, was zu einer tendenziell schwächeren Verschiebung von Arbeitsplätzen zu Vorleistern führt

Ein internationaler Vergleich zeigt, dass OEMs aus verschiedenen Ländern unterschiedliche Strategien bzgl. ihrer Unternehmensbeziehungen verfolgen. Dies hat Auswirkungen auf den entstehenden Mitarbeiterbedarf, da durch den beschriebenen Grad der Beziehungsintensität somit außerdem die regionale Verteilung des Mitarbeiterbedarfs beeinflusst wird.

Insbesondere bei der für die Wertschöpfung stark relevanten Komponente Batterie werden Unterschiede im internationalen Vergleich deutlich. Europäische Unternehmen unterhalten tendenziell internationalere Beziehungen als beispielsweise asiatische Unternehmen. Dieser höhere Grad der Beziehungsintensität im internationalen Sinn kann dazu führen, dass die Wertschöpfung und dadurch auch der Mitarbeiterbedarf zwischen den an den Beziehungen beteiligten Ländern verteilt werden.

8.4 Ausblick und Klärung des weiteren Forschungsbedarfs

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ELAB wurde untersucht, welche Auswirkungen die Herstellung alternativer Antriebsstränge in einem idealtypischen Produktionswerk hervorrufen. Dabei wurde mittels verschiedener Szenarien zur zukünftigen Marktverteilung im Bereich des automobilen Antriebsstrangs analysiert, welche Effekte sich hierbei in quantitativer wie auch qualitativer Weise auf Beschäftigung und Standortumgebung ergeben.

Derzeitige Entwicklungen in der Herstellung elektromobiler Antriebsstrangkomponenten zeigen deutlich die steigende Verflechtung in der gesamten automobilen Wertschöpfungskette. Das Beispiel Batteriesystem verdeutlicht sehr gut, dass die industrielle Herstellung der Komponenten enorme Kompetenzen in verschiedenen Bereichen erfordert. Um den hohen Anforderungen einer serienfähigen Herstellung gerecht zu werden und die Komplexität zu meistern, zeichnen sich derzeit eine sehr große Zahl an Unternehmensverbindungen in Form von Strategischen Allianzen und Lieferbeziehungen in den Wertschöpfungsstrukturen ab. Es bleibt abzusehen, inwiefern die vorgestellten Netzwerke der Zusammenarbeit Bestand haben werden. Die Validierung oder Falsifikation der länder- und kontinentenspezifischen Interpretationen der Wertschöpfungsnetzwerke stellen einen zukünftigen Forschungsgegenstand dar. Ebenfalls gilt es zu analysieren, welche Kooperationsformen in welchen Bereichen zukünftig Bestand haben werden und welche Erfolgsfaktoren der Zusammenarbeit genannt werden können.

Weiterhin gilt es zu untersuchen, welche Auswirkungen beispielsweise Make-or-Buy-Entscheidungen bei den für den elektrifizierten Antriebsstrang relevanten Komponenten auf die Wertschöpfungsarchitektur haben werden. Diese müssen vor allem quantitativ untersucht und validiert werden. Diese Thematik war nicht Bestandteil des vorliegenden Forschungsvorhabens, erfährt aber vor allem vor dem Hintergrund nach der Frage, wo zukünftig Arbeitsplätze geschaffen werden, größte Relevanz. In diesem Zusammenhang muss ebenfalls erforscht werden, wohin sich die Kompetenzen im Automobilbau entwickeln werden. Relevante Fragestellungen, vor allem für die deutsche Industrie, stellen hierbei dar, welche neuen Geschäftsfelder sich innerhalb der Automobilwirtschaft entwickeln werden und wie sich die Rollen der unterschiedlichen Akteure innerhalb der Wertschöpfungskette zukünftig verteilen.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Forschungsprojekt „Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung“ (ELAB) untersucht die Wirkung alternativer Antriebskonzepte auf eine idealtypische Antriebsstrangproduktion. Die zentrale Fragestellung dabei ist, welche Beschäftigungseffekte aus dem technologischen Wandel zur Elektromobilität für die Antriebsstrangproduktion resultieren. Diese Fragestellung lässt sich dabei in die zwei Wirkungsdimensionen „Quantitative Beschäftigungswirkungen“ sowie „Qualitative Beschäftigungswirkungen“ aufgliedern. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden sieben Forschungsfragen entworfen und im Rahmen des Forschungsprojektes bearbeitet. Der Abschlussbericht stellt die Projektergebnisse in differenzierter Form dar, wobei dessen Hauptkapitel ebenfalls nach den Forschungsfragen und damit in sieben unterschiedliche Bereiche gegliedert ist. Die jeweiligen Forschungsfragen sowie elementaren Forschungsergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Forschungsfrage: Wie wirkt die Elektrifizierung des Antriebstrangs auf die Gestaltung zukünftiger Fahrzeug- und Antriebskonzepte?

Forschungsergebnisse:

Das Ziel des Projektteils war es, die zukünftig produktionsrelevanten Bauteile verschiedener elektrifizierter Antriebsstränge zu identifizieren und detailliert zu beschreiben. Hierfür wurden in einem ersten Schritt diejenigen Antriebskonzepte hergeleitet, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion der Zukunft gefertigt werden können. Dazu zählen

- Internal Combustion Engine Vehicle (ICE), als Benzin- und Dieselmotor angetriebene Fahrzeuge
- Mild Hybrid Electric Vehicles (Mild-HEV)
- Hybrid Electric Vehicles (HEV), als Vollhybrid oder Plug-In-Hybrid
- Battery Electric Vehicles (BEV)
- Range-extended Electric Vehicles (REX)
- Fuel Cell Vehicles (FCV)

Anschließend wurden die definierten Referenz-Antriebsstränge einer Detailanalyse unterzogen, um sie in produktionsrelevante Systeme, Subsysteme, Komponenten und Einzelteile zu zerlegen. Trends in der Technologieentwicklung sind bei jedem relevanten System identifiziert und in den Bauteilanalysen berücksichtigt worden. Als zu untersuchende Komponenten wurden wie nachfolgend festgelegt und weiter detailliert:

- Verbrennungsmotoren
- Getriebe (8-Gang-Automatik, 8-Gang-Hybrid, 2-Gang-Übersetzung)
- Elektrische Maschine (E-Motor, Generator)
- Batterie-System (Rund-Zelle, Pouch-Zelle)
- Leistungselektronik
- Brennstoffzellen-Systeme (inklusive Tank)

Auf Basis der Erkenntnisse wurden den jeweiligen Produktkomponenten zusätzlich in einem weiteren Schritt charakteristische Werkstoffe und Fertigungskategorien zugeordnet. Hiermit konnte eine geeignete Datenbasis für die in den nachfolgenden Projektteilen durchzuführende detaillierte Modellierung von Produktionsprozessen konventioneller und neuer Antriebsstrangkomponenten geschaffen werden.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass der Technologiewandel in vollem Gange ist: alle Konzepte, die konventionellen eingeschlossen, werden weiter entwickelt. Es wird auf diese Weise zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Konzepten und Komponenten kommen.

Absatzszenarien

Forschungsfrage: Wie könnte die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mittel- und langfristig den Fahrzeugabsatz beeinflussen?

Forschungsergebnisse:

Ziel des Arbeitskapitels war es zu analysieren, wie die Elektrifizierung des Antriebsstrangs mittel- und langfristig den Fahrzeugabsatz beeinflussen könnte. Vor dem Hintergrund der Herausforderungen, die sich durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs für ein Aggregatwerk stellen, ist es essentiell, die zukünftige Marktdurchdringung elektrisch angetriebener Fahrzeuge und damit die quantitative Auswirkung auf das Werk abzuschätzen. Dies erfolgte durch die Definition von Markt-Szenarien.

Um im weiteren Projektverlauf die Auswirkungen auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion und deren Standortumgebung ableiten zu können, wurden ausgehend von der Analyse veröffentlichter Szenarien in Politik, Forschung und Industrie ein Referenzszenario sowie alternative zukünftige Entwicklungen abgeleitet. Hierbei wurden neben einem weiterhin verbrennungsmotorisch dominierten Szenario zwei – für die Elektromobilität – sehr positive Marktentwicklungen skizziert. Diese beiden Extremszenarien antizipieren zum einen eine stark von Batteriefahrzeugen geprägten Neufahrzeugmarkt und zum anderen einen signifikanten Markterfolg von Brennstoffzellenfahrzeugen. Es wurden damit insgesamt vier Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Wirkungen entworfen:

- ELAB-Referenzszenario
- BEV-Szenario
- FCV-Szenario
- ICE-Szenario

Die Szenarien umfassen hierbei alle für eine idealtypische Antriebsstrangproduktion relevanten Fahrzeugkonzepte. Namentlich werden in den Szenarien die Antriebsstränge „Verbrennungsmotor“ (Internal Combustion Engine, ICE), „Mild-Hybrid“, „Hybrid“ im Sinne eines Vollhybriden inklusive Netzanschluss (Hybrid Electric Vehicle, HEV), „Range-extended Electric Vehicle“ (REX), „Batterie“ (Battery Electric Vehicle, BEV) sowie „Brennstoffzelle“ (Fuel Cell Electric Vehicle, FCV) betrachtet.

Um den Marktanteil elektrifizierter Antriebskonzepte mittel- bis langfristig beurteilen zu können, erstreckt sich der analysierte Zeithorizont der Marktszenarien bis 2030, mit Aussicht auf 2050.

Im Referenzszenario werden beispielsweise im Jahr 2030 40% Verbrenner, 15% Mildhybride, 20% Vollhybride, 10% Range-Extender, 10% Batterieelektrische Fahrzeuge und 5% Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb hergestellt. Auch die anderen Marktszenarien deuten darauf hin, dass im Jahr 2030 mit einem Mix verschiedener Antriebskonzepte zu rechnen ist.

Festzuhalten bleibt, dass es für die Elektromobilität keinen Königsweg gibt. Auf mittlere Sicht werden verschiedene Antriebskonzepte parallel am Markt existieren, wenn auch je nach vorliegenden Rahmenbedingungen in unterschiedlicher Stärke.

Produktion der Komponenten

Forschungsfrage: Auf welche Bereiche wirkt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in einer Aggregateproduktion und welche Fertigungsprozesse sind zu beherrschen?

Forschungsergebnisse:

Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurden die für das Forschungsvorhaben relevanten Schlüssel-Komponenten in ihren Ausführungsformen und charakteristischen Merkmalen beschrieben und hinsichtlich derzeitiger und potentieller Produktionstechnologien detaillierter analysiert. Die Untersuchung berücksichtigt sowohl Fertigungs- als auch Montageprozesse unter Berücksichtigung benötigter und zur Herstellung geeigneter Werkstoffe. Hierbei werden Prozessschritte und Technologien untersucht, die in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion realisiert werden können.

Bedingt durch die Vielfalt in den Antriebskonzepten werden im Kontext einer Antriebsstrangproduktion unterschiedliche Anforderungen an eine Ausgestaltung der Komponenten- und Systemherstellung gestellt. Entwicklungspfade von Hybridfahrzeugen erfordern beispielsweise im Vergleich zu konventionellen Antrieben mit einem Verbrennungsmotor zusätzliche Komponenten wie die Leistungselektronik, das Batteriesystem oder die elektrischen Maschinen. Diese lassen sich teils nur durch den Einsatz zusätzlicher, derzeit nicht innerhalb des Produktionsprozesses eingesetzter Fertigungsverfahren herstellen. Die analysierten Komponenten sind: der Verbrennungsmotor, das Getriebe und Hybridgetriebe, die elektrische Maschine (sowie Generator), die Leistungselektronik, das Brennstoffzellensystem (sowie dessen Wasserstoffdrucktank) und das Batteriesystem.

Neben Anwendungsmöglichkeiten traditioneller Verfahren, wie dem Gießen, rücken vermehrt auch neue Techniken in den Mittelpunkt der Betrachtung. Zu erwähnen ist das Laserschweißen, unterschiedliche Ansätze bei der Wickeltechnologie oder das Plasmabeschichten. Der Einsatz dieser Technologien in der Antriebsstrangproduktion wird derzeit diskutiert. Weiterhin erfordern die sehr komplexen Montage- und Wickelprozesse innovative Lösungen im Bereich der Handhabungstechnik, sodass verstärkt an dem Einsatz von Industrierobotern und innovativen Tripod- und Parallelkinematiken gearbeitet wird. Stärker an Bedeutung gewinnen könnten zudem eine Reihe von umformenden Verfahren wie das Pressen, Ziehen oder Biegen. Weiterhin wurden Informationen dafür gefunden, dass heutige Verfahren zur mechanischen Bearbeitung von Komponenten der konventionellen Verbrennungskraftmaschine zukünftig mehr oder weniger an Bedeutung verlieren könnten.

Neben neu benötigten Fertigungsverfahren werden sich zukünftig aber auch im Bereich der Materialauswahl Veränderungen ergeben. So könnte der Anteil an Kunststoffen im Automobilbau in den nächsten Jahren weiter ansteigen. Potentielle Anwendungsbereiche moderner polymerer Werkstoffe lassen sich hierbei nicht nur im klassischen Leichtbau finden, sondern sie könnten zukünftig auch dazu beitragen, bestehende Herausforderungen im Bereich der Traktionsbatterie oder beim Wärmemanagement zu bewältigen. Ferner ist davon auszugehen, dass zukünftige Produktionsstrukturen mit einer größeren Anzahl an Produktvarianten umgehen müssen. Dies bedingt wiederum neue Anlagenkonzepte und integrierte Prozessketten, welche besonders auf diese Variantenflexibilität ausgerichtet sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Um Komponenten für den elektrifizierten Antriebsstrang produzieren zu können, müssen die Hersteller bislang im Automobil-

bau nicht eingesetzte und auch gänzlich neue Fertigungsverfahren, Technologien und Materialien integrieren.

Personalbedarf der Produktion der Komponenten

Forschungsfrage: Welchen Personalbedarf erfordert die Produktion der Komponenten des neuen Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang?

Forschungsergebnisse:

Für die Bestimmung des Personalbedarfs wird der Arbeitsaufwand der jeweiligen Komponente bezogen auf einen bestimmten Leistungskennwert ermittelt. Der Personalbedarf wurde sowohl für die Komponenten des neuen sowie des konventionellen Antriebsstrangs ermittelt. Die Erhebung erfolgte stückzahlabhängig für große und mittlere bzw. niedrige Stückzahlen. Die Ergebnisse hieraus fließen direkt in die spätere Berechnung des Personalbedarfs einer idealtypischen Produktion ein. Dort werden diese verwendet, um den Einfluss der Elektrifizierung unter Berücksichtigung der erstellten ELAB-Szenarios auf den Gesamt-Personalbedarf in einer idealtypischen Aggregateproduktion analysieren zu können.

Da im Forschungsprojekt die Effekte und Auswirkungen der Elektrifizierung auf die idealtypische Antriebsstrangproduktion analysiert werden, wurde die Erhebung des Personalbedarfs auch auf die Produktion fokussiert. Ein sich unweigerlich durch die Elektrifizierung ergebender zusätzlicher Personalbedarf in Forschung und Entwicklung wurde nicht aufgenommen oder analysiert. Ebenfalls erfolgte keine Aufnahme von möglichen Änderungen im Bereich Verwaltung, allgemeine Planung, etc.

Eine Klassifizierung der analysierten Tätigkeiten in der Produktion erfolgte in die Bereiche direkte Mitarbeiter, produktionsnahe indirekte Mitarbeiter sowie indirekte Mitarbeiter. Um die Vergleichbarkeit zum aktuellen Status-Quo gewährleisten zu können, wurden die Daten zum Personalbedarf sowohl für die konventionellen Komponenten als auch für die neuen Komponenten erhoben. Die erhobenen Werte des Personalbedarfs stammen aus Expertengesprächen bei Unternehmen, welche in der Herstellung der betrachteten Komponenten tätig sind. Die Interviewergebnisse werden mit Werten aus einer Sekundärdaten-Recherche zusammengeführt, korreliert und validiert.

Hieraus ergibt sich beispielsweise für die Elektrische Maschine mit 100kW und einem wertmäßigen Eigenfertigungsanteil von 50% folgender Netto-Personalbedarf: Bei einem Produktionsvolumen von 100.000 Einheiten/Jahr: 84 Direkte Mitarbeiter (76%), 20 Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter (18%), 6 Indirekte Mitarbeiter (5%). Sowie bei einem Produktionsvolumen von 500.000 Einheiten/Jahr: 260 Direkte Mitarbeiter (79%), 52 Produktionsnahe indirekte Mitarbeiter (16%), 16 Indirekte Mitarbeiter (5%).

Die dargestellten Daten zum Personalbedarf müssen gemäß den Anforderungen des Forschungsprojektes im weiteren Verlauf angepasst werden. Dies bezieht sich sowohl auf eine Anpassung des Produktionsvolumens, als auch auf die Umstellung von Netto- auf Brutto-Werte. Darüber hinaus hat eine Anpassung der Basiskomponenten an die im Rahmen der Szenarien definierten Komponenten zu erfolgen. Basierend auf den ermittelten stückzahlabhängigen Zahlen werden im Weiteren Personalbedarfe einer idealtypischen Produktion für die in ELAB definierten Szenarien ermittelt.

Personalbedarf einer idealtypischen Produktion

Forschungsfrage: Wie stark ist der Einfluss der Elektrifizierung auf den Gesamtpersonalbedarf in einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion?

Forschungsergebnisse:

Im Rahmen des ELAB-Projekts wurde ein Tool zur quantitativen Analyse des Mitarbeiterbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion erstellt. Unter Berücksichtigung der zuvor erarbeiteten Szenarien und Fahrzeugkonzepte sowie den ermittelten stückzahlabhängigen Personalbedarfen der Komponenten, können damit mögliche Veränderungen des Personalbedarfs einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion aufgezeigt werden. Diese Analyse erfolgte auch unter Berücksichtigung und Festlegung verschiedener Annahmen zur idealtypischen Antriebsstrangproduktion. Für die Ermöglichung der Interpolation und Extrapolation zwischen den stückzahlabhängigen Werten des Personalbedarfs sind klare Regeln und Annahmen getroffen worden, um die Berechnungen auch für neue Szenarien oder einen neu ermittelten Personalbedarf erneut durchführen zu können.

Der Personalbedarf einer idealtypischen Produktion wurde für die unterschiedlichen Markt-Szenarien erhoben und soll beispielhaft am Referenzszenario dargestellt werden: Beim Referenzszenario führen in Summe die alten und neuen Komponenten zu einem Anstieg des Personalbedarfs in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion. In diesem Szenario steigt der Gesamtbedarf an Mitarbeitern in drei Phasen von zunächst 6.000 auf 7.200 Mitarbeiter.

- Die erste Phase läuft von 2010 bis 2015 und ist durch einen Anstieg des Gesamtbedarfs gekennzeichnet. Die Bedarfe der konventionellen Komponenten Getriebe (außer Hybrid) und Verbrennungskraftmaschine steigen leicht, während neue Komponenten hinzukommen. Die leichte Steigerung des Personalbedarfs bei den konventionellen Komponenten entsteht dadurch, dass die weiterhin hohen Produktionszahlen für ICE, Mild und HEV um die Verbrennungskraftmaschine für REX sowie um das Getriebe (außer Hybrid) für REX und BEV ergänzt werden. Diese bedürfen jeweils aufgrund geringer Stückzahlen und damit noch nicht realisierbarer Massendegressionsvorteile (noch keine „Economies of Scale“) einen Grundbedarf an Personal. Daher steigt der Personalbedarf der konventionellen Komponenten trotz des sehr kleinen Marktanteils der Konzepte BEV und REX (zusammen 3% in 2015).
- Von 2015 bis 2020 steigen die Bedarfe der neuen Komponenten weiter an, jedoch kommt es zu einer Abnahme bei den konventionellen Komponenten (außer Hybridgetriebe). Der Gesamtbedarf fällt leicht.
- In der dritten Phase (2020 bis 2030) erfährt die Komponente Hybridgetriebe eine stärkere Steigerung, die den Wegfall beim Getriebe (außer Hybrid) kompensiert. Die sonstigen neuen Komponenten steigen alle leicht stärker. Dies führt zu einer minimalen Steigerung des Gesamtpersonalbedarfs.

Durch den Wandel zur Elektromobilität ist in den nächsten zwei Jahrzehnten unter den modellhaften Bedingungen der Studie in allen Szenarien eine stabile bis steigende Beschäftigungssituation in der Antriebsstrangproduktion zu erwarten. Damit ist allerdings keine Aussage darüber getroffen, wie sicher die Arbeitsplätze in den bestehenden Produktionsstrukturen bzw. in regionalen Automobilclustern sind. Innerhalb der Wertschöpfungskette kann es zu massiven Verschiebungen und Umbrüchen kommen. Die Antriebsstrang-Hersteller können ihren Personalbedarf halten oder sogar steigern, sofern sie zusätzlich zu den bisherigen Komponenten des konventionellen auch Komponenten für den elektrifizierten Antriebsstrang produzieren.

Kompetenzanforderungen und Qualifikationen

Forschungsfragen: Wie verändern sich Kompetenzanforderungen im Technologiewandel? Welche Qualifikationen von Beschäftigten sind für die Produktion von neuen Antriebssträngen notwendig? Wie können Institutionen der Standortumgebung den Technologiewandel unterstützen?

Forschungsergebnisse:

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, das zeigen die bisherigen Ergebnisse der ELAB-Analyse, wird die bekannten Produktionsprozesse in der Automobilindustrie gravierend verändern. Mit modifizierten oder gar gänzlich neuen Verfahren ist aber immer auch ein Wandel der Arbeitsinhalte und damit der Kompetenzanforderungen und Qualifikationen der Beschäftigten verbunden. Dies betrifft im Fall der Elektrifizierung des Antriebsstrangs die gesamte Prozesskette von Forschung und Entwicklung (FuE) bis hin zum Recycling. Im Fokus der ELAB-Analyse liegen die neuen Kompetenzanforderungen für die Fertigung und Montage von Komponenten der alternativen Antriebsstränge

Um Kompetenzanforderungen und Qualifizierungsbedarfe zu ermitteln, wurde ein Methodenmix aus drei Bausteinen gewählt: Die ELAB-Analyse der Produktionsprozesse, Gespräche mit einer Vielzahl von Experten aus Unternehmen, Forschungsinstituten und anderen Einrichtungen, die sich mit dem Thema befassen, sowie drittens eine Literaturlauswertung.

Es muss davon ausgegangen werden, dass mit dem Umstieg zur Elektromobilität ein deutlicher Wandel in der Arbeitswelt verbunden ist. Kompetenzanforderungen und Qualifikationen der Beschäftigten werden sich nach und nach verändern. In der Produktion von Antriebssträngen werden Kenntnisse in Elektrik/Elektronik immer wichtiger. Klassische Qualifikationen in Metall und Mechanik sind künftig weniger gefragt.

Gleichzeitig gewinnen Montageprozesse im Vergleich zu formgebenden Fertigungsverfahren an Bedeutung. Diese Montagearbeiten können allerdings nicht mit einer „einfachen Tätigkeit“ gleichgesetzt werden, sondern werden immer komplexer, flexibler und anspruchsvoller. Weiterhin ergibt sich ein „Qualifikationsshift“ hin zu mehr Fach- und Prozesskompetenzen und auch Erfahrungswissen wird in der Montagearbeit immer bedeutsamer.

Bedingt durch die Neuartigkeit der neuen Antriebsstrang-Komponenten ergeben sich auch neue Kompetenzanforderungen: Diese erfolgen insbesondere aufgrund der künftig wesentlich höheren Automatisierung sowie durch die notwendige Sicherstellung hoher, gleichbleibender Qualität für die automobilen Großserienfertigung. Weitere komponentenspezifische Qualifikationserfordernisse ergeben sich insbesondere bei folgenden Komponenten:

- Batteriesystem: Verbindungs-/Fügetechnik (Arbeiten unter Spannung), Qualitätssicherung, Prüfung, Tests (Elektrik, Dichtigkeit).
- Elektromotoren: Montage, Qualitätssicherung, Prüfung, Tests.
- Leistungselektronik: Molding-Prozesse, Bauelemente-Bestückung, Qualitätssicherung, Prüfung, Tests.
- Brennstoffzellensysteme: Technische Kompetenzen (z.B. Dünnschichtbearbeitung, elektrochemische Beschichtung) und Qualitätssicherung, Sorgfalt, Reinheit. Spezifische Kenntnisse bei Wasserstoff-Tanks (Hochdruck, Leichtbau).

Aber auch in der Produktion konventioneller Antriebsstränge verändert sich das Kompetenzprofil. Die Fertigungsverfahren für optimierte Verbrennungsmotoren und Getriebe erfordern hohe Genauigkeit, Sorgfalt sowie den Umgang mit Reinraumtechnologien. Gleichzeitig werden neue Werkstoffe und Leichtbauweisen für das gesamte Fahrzeug immer wichtiger, woraus sich ebenfalls neue Kompetenzanforderungen für Facharbeiter und Entwickler ableiten.

Der Wandel zur Elektromobilität zeigt auch eine hohe Notwendigkeit zur weiteren Qualifizierung sowie Weiterbildung der Mitarbeiter auf. Als zentrales neues Qualifikationserfordernis für Beschäftigte in Produktion und Montage wird der Umgang mit Hochvolt-Systemen gesehen. Während Beschäftigte in der Produktion von Autos mit Verbrennungsmotor mit niedrigen elektrischen Spannungen zu tun haben, werden sie bei elektrifizierten Antriebskonzepten mit bis zu 1.000 Volt konfrontiert. Sie müssen entsprechend in der Lage sein, elektrotechnische Arbeiten zu beurteilen, mögliche Gefahren zu erkennen und sich zu schützen. Für die Beschäftigten in der Produktion reicht jedoch meist eine „Hochvolt-Sensibilisierung“ als Qualifikationsschritt aus. Diejenigen, die Hochvolt-System in Betrieb nehmen, prüfen oder nacharbeiten müssen dagegen zusätzlich zur entsprechenden Elektrofachkraft qualifiziert werden.

Die Berufsausbildung im deutschen dualen System ist prinzipiell auf den Wandel vorbereitet. Die gewerblich-technischen Berufsbilder sind offen für die Integration innovativer, die Elektromobilität betreffender Inhalte und werden somit den neuen Qualifikationsanforderungen gerecht. Zusätzliche Module, wie zum Beispiel der Umgang mit Hochvolt-Systemen, können in die bestehenden Berufsbilder integriert werden.

Mit der Verschiebung der Wertschöpfungsanteile von Metall/Mechanik zu Elektrik/Elektronik geht ein struktureller Wandel im Mix der Ausbildungsberufe einher. Mechatronikerinnen oder der Elektroniker für Automatisierungstechnik ersetzen zunehmend die klassischen Metaller. Dieser Trend wird sich durch die Elektrifizierung fortsetzen.

Um die Bildungsinfrastruktur auf den Technologiewandel auszurichten, ist es wichtig – so auch ein Ergebnis der Nationalen Plattform Elektromobilität – alle Akteure der beruflichen und akademischen Bildung in ein Netzwerk einzubinden. Auf diese Weise lassen sich abgestimmte Konzepte für zukünftige Aus- und Weiterbildungsschritte sowie eine koordinierte, transparente Umsetzung erreichen.

Neue Kompetenzanforderungen führen zu Qualifikationsbedarfen, die einerseits durch Ausbildung von Fachkräften abgedeckt werden, andererseits durch Fort- und Weiterbildung. Hier ist die große Frage, wie Unternehmen die vorhandenen Beschäftigten auf den Technologiewandel einstellen. Methodisch sollte hier verstärkt das Konzept der am Arbeitsprozess orientierten Weiterbildung zum Zuge kommen, bei dem Arbeiten und Lernen eng miteinander verknüpft sind. Wichtig ist zudem, Standards für Qualifizierungsinhalte und -abschlüsse festzulegen – insbesondere im stark wachsenden Angebot der Weiterbildung rund um den Umgang mit Hochvolt-Systemen. Zusammenfassend müssen die Lehrinhalte in der beruflichen Aus- und Weiterbildung an die besonderen Qualifikationen, die die Elektromobilität erfordert, angepasst werden. Bestehende Angebote sollten stärker in Richtung Kompetenzen in Elektrik/Elektronik erweitert werden. Nur mit qualifizierten Fachkräften kann die Industrialisierung der neuen Komponenten des elektrifizierten Antriebsstrangs in Deutschland gelingen – und damit Beschäftigung und Wertschöpfung gesichert werden.

Branchenumfeld, Wertschöpfungskette und Strategische Allianzen

Forschungsfragen: Wie wirkt sich der Technologiewandel „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ auf die Standortumgebung aus? Welche Veränderungen ergeben sich durch neue Allianzen und Zusammenschlüsse in der elektromobilen Wertschöpfungskette?

Forschungsergebnisse:

Die Wertschöpfungskette der Automobilindustrie und das Branchenumfeld werden im Rahmen des Forschungsprojekts ELAB im Sinne einer „Wirkungsabschätzung“ untersucht, bei der die Frage nach Wirkungen auf Zuliefererstrukturen und nach künftigen Herausforderungen für Zulieferer in der Standortumgebung im Zentrum stehen. Zudem wird mit der Analyse „Strategischer Allianzen“ der aktuellen Struktur der Wertschöpfungskette nachgegangen, um internationale Unterschiedlichkeiten und mögliche zukünftige Veränderungen aufzuzeigen.

Wertschöpfungskette und Branchenumfeld

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs impliziert eine Reorganisation der Wertschöpfungskette mit einer Neuverteilung von Wertschöpfungsanteilen und damit einem Wettbewerb etablierter und neuer Zulieferer. Der Wandel zur Elektromobilität kann daher enorme Auswirkungen für das „Autoland Baden-Württemberg“ (mit seiner starken technologischen Ausrichtung auf den Antriebsstrang) besitzen. Ein Management des Wandels ist speziell für KMU-Zulieferer eine große Herausforderung, da KMU-Zulieferer bisher wenig auf die Herausforderung Elektromobilität vorbereitet sind. Die technologische Zukunftsfähigkeit zahlreicher Autozulieferer wird dabei hinsichtlich alternativer Antriebskonzepte kritisch eingeschätzt. Die Engpässe bei den KMU-Zulieferern sind aktuell:

- Generelle Innovationsdefizite
- Technologischer Fokus auf Verbrennungsmotoren
- Unzureichende Awareness für die Herausforderung Elektromobilität.

Für die Unternehmensstrategie von Zulieferern empfiehlt sich aktives Handeln im technologischen Wandel des Automotive-Bereichs, sowohl was Produktinnovationen als auch was Prozess- und Fertigungskompetenzen betrifft. Eine ergänzende Strategieoption liegt in der Diversifizierung des Produktportfolios.

Strategische Allianzen

Aus der klassischen Zuliefererstruktur unterschiedlicher Stufen (engl. Tier) und dem Automobilhersteller, entwickelt sich aktuell ein Geflecht miteinander verwobener Netzwerkbeziehungen. Dieser Prozess ist insbesondere in Deutschland in vollem Gang. Das zeigt etwa das Beispiel Batteriesystem. Der Energiespeicher ist die Kernkomponente bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und bietet technisch noch große Potenziale, die es auszuschöpfen gilt. Gerade wegen des großen Entwicklungsbedarfs lässt sich in der Batterietechnik eine hohe Dynamik bei strategischen Allianzen beobachten. Die Beziehungsvielfalt bei den Batterien spiegelt weiterhin deren Signifikanz für den elektrischen Antrieb wider. Ähnliche Verbünde bestehen aber auch bei Komponenten wie Elektromotor, Leistungselektronik oder Brennstoffzellen und wurden im Rahmen des Forschungsprojektes national und international analysiert. Einige Erkenntnisse insbesondere für Allianzen der deutschen OEMs und Zulieferer sind wie folgt:

- Deutsche Hersteller fahren häufig eine mehrgleisige Politik und kooperieren mit einer Vielzahl an Zulieferern und teils anderen OEMs

- Das Ziel der OEMs ist nicht nur Technikverständnis, sondern insbesondere eine Förderung des Wettbewerbs unter Zulieferern. Der OEM sieht sich damit weiterhin im Zentrum des Marktverständnisses
- Die Beziehungslandschaft ist von hoher Dynamik geprägt; Allianzen entstehen und enden monatlich
- Es ergeben sich viele Veränderungen in den neuen Komponenten mit Auswirkungen auf die Beschäftigung in der idealtypischen Antriebsstrangproduktion und deren Standortumgebung.

Elektromobilität eröffnet Unternehmen somit nicht nur Chancen, sondern stellt diese auch vor Herausforderungen. Die besondere Herausforderung für etablierte Zulieferer mit einer hervorragenden Kompetenz im verbrennungsmotorbasierten Antriebsstrang liegt in der Fortschreibung des erarbeiteten Wettbewerbsvorteils in der etablierten Technologie bei parallelem Aufbau von Kompetenz und Produktionskapazität hinsichtlich der alternativen Antriebe. Innerhalb der Wertschöpfungskette kann es zu massiven Verschiebungen, vor allem bei Zulieferunternehmen, kommen. Es bilden sich neue Produktionsstrukturen. Dem „Management des Wandels“ kommt damit eine besondere Bedeutung zu; und zwar sowohl für die Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette als auch für das institutionelle Umfeld.

ELAB: Zusammenfassung







Elektromobilität und Beschäftigung
Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs
auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB)
STUDIENERGEBNISSE

- Basierend auf den **Marktszenarien** ist im **Jahr 2030** mit einem **Mix verschiedener Antriebskonzepte** zu rechnen.
- Die **Herstellung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten** erfordert Kompetenzen bislang im Automobilbau nicht eingesetzter Fertigungsverfahren.
- Die Antriebsstrang-Hersteller können ihren **Personalbedarf** halten oder sogar steigern, sofern sie zusätzlich zu den konventionellen auch Komponenten für den **elektrifizierten Antriebsstrang produzieren**.
- Innerhalb der Wertschöpfungskette kann es zu massiven **Verschiebungen**, vor allem bei **Zulieferunternehmen**, kommen.
- Mit der Elektromobilität ist ein **Wandel in der Arbeitswelt** verbunden, mit sich verändernden Kompetenzanforderungen und Qualifikationen der Beschäftigten.
- Erforderlich wird eine Anpassung der **beruflichen Aus- und Weiterbildung** sowie eine Standardisierung von Qualifizierungsinhalten und -abschlüssen.

© Fraunhofer IAO, IAT Universität Stuttgart






Abbildung 120: Zusammenfassung der ELAB-Forschungsergebnisse (Quelle: Elektromobilität und Beschäftigung (ELAB): Abschlusspräsentation)

10 Literaturverzeichnis

- CNTV. (19. August 2010). Abgerufen am 6. Oktober 2011 von <http://english.cntv.cn/program/bizasia/20100819/102740.shtml>
- GM Inside News. (2010). Abgerufen am 11. 04 2012 von <http://www.gminsidenews.com/forums/f12/gm-fuel-cell-tech-production-2015-a-90097/>
- People's Daily Online. (18. August 2010). Abgerufen am 7. Oktober 2011 von <http://english.peopledaily.com.cn/90001/90778/90860/7108685.html>
- Clean Energy Partnership. (2011). Abgerufen am 04. Oktober 2011 von <http://www.cleanenergypartnership.de/>
- cleanthinking. (2011). Abgerufen am 17. April 2012 von <http://www.cleanthinking.de/wp-content/uploads/Lithium-Ionen-Batterie-von-Johnson-Controls-Saft.jpg>
- Cluster Leistungselektronik. (2011). Abgerufen am 22. März 2012 von http://www.clusterle.de/uploads/media/BMBF_523_Hi-Level_10-2011_low.pdf
- Saftbatteries. (2011). Abgerufen am 17. April 2012 von <http://www.saftbatteries.com/images/Produits/Photos/VLFe-2.jpg>
- SB LiMotive. (2011). Abgerufen am 17. April 2012 von <http://www.sblimotive.com/en/products.html>
- The Linde Group. (2011). Abgerufen am 4. Oktober 2011 von <http://www.linde-gas.de/international/web/lg/de/like35lgde.nsf/0/D7E3FB712323813DC125762D0041E2C5>
- ajv-bintelligence. (2012). Abgerufen am 10. April 2012 von http://www.ajv-bintelligence.com/index.php?view=article&catid=26%3Adas-kleine-lexikon-fuer-management-a-science&id=103%3Aerfahrungskurve&format=pdf&option=com_content&Itemid=29
- Betriebswirtschaft Info. (2012). Abgerufen am 10. April 2012 von <http://www.betriebswirtschaft.info/1979.html>
- emc-eu1. (2012). Abgerufen am 11. April 2012 von http://www.emc-eu.de/index-Dateien/HPSU_html%20Version.html#BZAntrieb
- emc-eu2. (2012). Abgerufen am 11. April 2012 von http://www.emc-eu.de/index-Dateien/HPSU_html%20Version.html#Hochdruck
- Wirtschaftslexikon Gabler. (2012). Abgerufen am 10. April 2012 von <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/lernkurve.html>
- Abele, E., & Reinhart, G. (2011). *Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München.
- Abele, E., Hohenstein, J., Pfeiffer, P., & von Wihl, E. (2009). Wandel im PKW-Antriebsstrang: Auswirkungen auf Produktionskonzepte. *Maschinenbau und Metallbearbeitung*, S. 12-16.
- Abele, E., Rumpel, G., Hohenstein, J., & Benning, K.-H. (11 2009). Elektromobilität - Konsequenzen für die Zerspanung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, S. 993-997.
- Ahluwalia, R., Hua, T., Peng, J., Lasher, S., McKenney, K., & Sinha, J. (Dezember 2009). Technical Assessment of Cryo-Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications. Argonne, Illinois, USA.
- Allespach, M., & Ziegler, A. (2012). *Zukunft des Industriestandortes Deutschland 2020*. Marburg.
- Allgaier. (2012). *allgaier*. Von <http://www.allgaier.de/de/content/automotive/highlights/batteriegeh%C3%A4use> abgerufen
- Annawald, M. (2005). *Ansätze für Regionales Arbeitsmarktmanagement. Konzeption und Diskussion an ausgewählten Beispielen*. Kaiserslautern.

- Audi. (2012). *Geschäftsbericht 2011*. Ingolstadt.
 (kein Datum). Automobilindustrie 2010.
- Bain & Company. (2010). *Zum E-Auto gibt es keine Alternative*.
- Baumeister, J., & Stattler, M. (2009). Innovative Produkte, flexible Produktion. Montage von Hybridmodulen bei ZF Sachs. In H. Schäfer, *Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge* (S. 164-173). Renningen: Expert Verlag.
- Blazejak, A. (2009). iMIEV Das Elektrofahrzeug von Mitsubishi. Präsentation während der PR Tour.
- BMBF. (2011). *Ausbildungsberufe für die Elektromobilität. Ein dynamisches Innovationsfeld bietet spannende Perspektiven*. Bonn.
- Böcker, J., Huber, T., Meyer, M., Peters, W., Pohlenz, D., & Specht, A. (Oktober 2010). Regelung elektrischer Traktionsantriebe in Elektro- und Hybridfahrzeuge. *at Automatisierungstechnik, Band 58*, S. 599-608.
- Bohr, B. (2011). *Systemzulieferer Bosch: Treibende Kraft im Wandel der Automobilindustrie. Referat beim Motorpresse-Kolloquium in Boxberg*. Stuttgart.
- Bonnekessel, S. (2011). Produktion von Li-Ionen-Akkus für Nutzfahrzeuge. *wt Werkstatttechnik online Jahrgang 101*, S. 454.
- Bräunig, K. (2012). *Wirtschaftliche Rahmenbedingungen für Elektromobilität. Präsentation beim ACOD-Kongress am 28.02.2012 in Leipzig*.
- Brunner, s., & Kehrle, K. (2009). *Volkswirtschaftslehre*. München: Vahlen.
- Bundesanzeiger. (2011). *Bekanntmachung Richtlinien zur Förderung von Forschung und Entwicklung "Schaufenster Elektromobilität", vom 13.10.2011*. Berlin.
- Busch, C. (2011). Lithium-Ionen Batterien, Flexible Montage Technologien. *Infotag eMobility und die Montage- und Handhabungstechnik*. Frankfurt am Main, 30.05.2011.
- BzA-BW, & WRS. (2009). *Die Brennstoffzelle in der Region Stuttgart. Analyse und Ausbau der Wertschöpfungsketten*. Stuttgart.
- Cebulski, B. (2011). Leistungselektroniken im Fahrzeugantrieb. *ATZ Elektronik 01/2011*.
- Christensen, C., Matzler, K., & von den Eichen, S. F. (2011). *The Innovator's Dilemma. Warum etablierte Unternehmen den Wettbewerb um bahnbrechende Innovationen verlieren*. München.
- Clement, U. (2010). Produktionssysteme & Facharbeit in der Autoindustrie. In Friedrich-Ebert-Stiftung (Hrsg.), *Perspektiven der Erwerbsarbeit: Facharbeit in Deutschland* (S. 40-49). Bonn.
- Conrads, R. (2004). *Regionales Arbeitsmarktmanagement: Umsetzung, Erfolge und Regelmäßigkeiten. Ein Beitrag zur angewandten sozialgeographischen Implementationsforschung*. Augsburg.
- Daimler. (2012). *Nachhaltigkeitsbericht 2011*. Stuttgart.
- Dempewolf, K.-H. (2011). Herausforderungen und Probleme bei der Fertigung von E-Maschinen für die Automobilindustrie. *wbk-Herbsttagung 2011* (S. 84-91). Karlsruhe: Shaker Verlag.
- Demuß, L. (2000). Technologische Veränderung beim Übergang vom konventionellen Antriebsstrang zur Brennstoffzelle. In L. Demuß, J. Garche, G. Hackenjos, L. Jörissen, W. Mannsbart, F. Marscheider-Weidemann, et al., J. Wengel, & E. Schirmeister (Hrsg.), *Innovationsprozesse vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle* (S. 111-177). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI).
- Deutsches Dialog Institut. (2011). *Zwischenauswertung der Themenanalyse zu Kontroversen in der Elektromobilität*. Berlin.
- DGUV. (2010). *BGI/GUB-I 8686. Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen*. Berlin.

- Diez, W., & Kohler, M. (2010). *Otto-, Diesel-, Elektromotor - wer macht das Rennen? Handlungsfelder zur Sicherung des Automobilstandorts Region Stuttgart*. (IHK Region Stuttgart, Hrsg.) Stuttgart.
- Dispan, J., & Meißner, H.-R. (2011). *Elektromobilität: Wirkungen auf regionale Wertschöpfungsketten und auf die Beschäftigung in Baden-Württemberg*. (IG Metall Baden-Württemberg, Hrsg.) Stuttgart.
- Dispan, J., Koch, A., Krumm, R., & Seibold, B. (2011). *Strukturbericht Region Stuttgart 2011. Entwicklung von Wirtschaft und Beschäftigung. Schwerpunkt: Umweltwirtschaft und Greentech im Maschinenbau*. Stuttgart.
- Dispan, J., Krumm, R., & Seibold, B. (2009). *Strukturbericht Region Stuttgart 2009. Entwicklung von Wirtschaft und Beschäftigung. Schwerpunkt: Umbruch in der Automobilregion*. Stuttgart.
- Dobroschke, A., & Kuehl, A. (2011). Mit ambidexterem Roboter wird das bisher manuelle Einlegen von Wicklungen in Elektromotoren flexibel automatisiert. *FAPS News, Ausgabe 6, März 2011, S. 5*.
- Dyer, J., & Singh, H. (1998). The relational view: Cooperative strategy and sources of interorganizational competitive advantage. *Academy of Management Review*(23), 660-679.
- Ecolean, D. (2010). Monschau History Presentation July 2009. *Herausforderungen einer Serienproduktion von Lithium-Ionen Batterien*. Aachen, 25.08.2010: Achim Kampker, Tony Schröer.
- Ehrke, M., Brötz, C., & Gerdes, F. (2012). Innovationsfähigkeit stärken durch Berufsbildung. In S. Pfeiffer (Hrsg.), *Smarte Innovation* (S. 299-325). Wiesbaden.
- E-mobil-BW, & WRS. (2012). *Living Lab BW-e-mobil. Schaufenster Elektromobilität - Wettbewerbsantrag*. Stuttgart.
- Enderlein, H., Krause, S., & Spanner-Ulmer, B. (2012). *Elektromobilität - Abschätzung arbeitswissenschaftlich relevanter Veränderungen*. Dortmund.
- Esch, S. (2011). *Strukturwandel in der Automobilindustrie. Die Bedeutung wirtschaftsfördernder Akteure bei der Implementierung neuer Antriebstechnologien. Am Beispiel der Elektromobilität in der Region Stuttgart*. Tübingen.
- Feldmann, K. (2009). *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte. Design, Konzepte, Strategien*. Berlin.
- Fleischer, J. (2011). Produktionstechnische Herausforderungen aus Sicht der Forschung. In *Produktionstechnische Herausforderungen aus Sicht der Elektromobilität* (S. 32-43). Aachen.
- Fox, E. M. (kein Datum). *Institute for International Economics*. Abgerufen am 10. Oktober 2011 von http://www.iie.com/publications/chapters_preview/56/10ie1664.pdf
- Franke, J. (2011). *Prozessentwicklung für die Serienfertigung von elektrischen Fahrerntrieben. Präsentation beim 4. E-Motive-Expertenforum am 7./8.09.2011 in Aachen*.
- Freialdenhoven, A. (2009). Wie reagiert die Automobil- und Zulieferindustrie auf die Herausforderung Elektromobilität? . In G. Erdmann, *Herausforderung Elektromobilität*.
- Friedrich, H., & Schmid, S. (2011). *Strukturanalyse von Automobilkomponenten für zukünftige elektrifizierte Fahrzeugantriebe*. Stuttgart.
- Fuchs, J., & Zika, G. (12 2010). Demografie gibt die Richtung vor. Arbeitsmarktbilanz bis 2025. In *IAB-Kurzbericht*. Nürnberg.
- Fuchs, J., Söhnlein, D., & Weber, B. (2011). *Rückgang und Alterung sind nicht mehr aufzuhalten. Projektion des Arbeitskräfteangebots bis 2050* (IAB-Kurzbericht Ausg.). Nürnberg.
- Gälweiler, A. (1986). *Unternehmensplanung: Grundlagen und Praxis*. Frankfurt-New York: Campus.

- Garcia, O. (2002). *DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen und Superkondensatoren*. Zürich: Dissertation ETH Zürich.
- Götze, U., & Rehme, M. (2011). *Elektromobilität - Herausforderungen und Lösungsansätze aus wirtschaftlicher Sicht*. Chemnitz.
- Grode, H. P. (2001). Fertigungsverfahren. In P. Kiehl, N. Breutmann, & W. Goethe, *Einführung in die DIN-Normen* (S. 1208). Stuttgart: B.G. Teubner Verlag.
- Gröninger, M., Horch, F., Kock, A., Pleiteit, H., Ponick, B., Schmidt, D., et al. (2011). Casting Production of Coils for electrical Machines. *1st. International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 220-222). Nürnberg.
- Gröter, H.-P., Lichtermann, J., & Stützle, R. (01 2011). Elektrifizierung auf dem Weg zur Großserie. *ATZ-elektronik*, S. 8-14.
- Gulati, R. (1995). Does familiarity breed trust? The implications of repeated ties for contractual choice in alliances. *Academy of Management Journal*, 38(1), 85-112.
- Hachtel, G., & Holzbaur, U. (2010). *Management für Ingenieure, Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik*. Wiesbaden: Vieweg & Teubner.
- Hagedorn, J. (2011). Winding Technology for cost- and material-optimized stators. *1st International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 187-194). Nürnberg.
- Henderson, B. D. (1984). *Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie*. Frankfurt-New York: Campus.
- Hofmann, J. (2010). *Fachkräftebedarf und Demographie. Präsentation bei einer Konferenz der IG Metall im 10.12.2010 in Pforzheim*.
- Hofmann, P. (2010). *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Wien.
- Honsel, G., & Flohr, U. (1/2012 2012). So funktionieren E-Motoren. *Technology Review Special Mobilität*, S. 58.
- Hörner, B., Holm, R., & Pirner, E. (2009). Ich will einen Beruf! - Qualifizierung für die Montage von morgen. In K. Feldmann (Hrsg.), *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte* (S. 246-271). Berlin.
- Hoven-Nieselstein, W., & Dallner, C. (2011). Kunststoffe und Mobilität - Wege und Herausforderungen in der Zukunft. *Fachtagung: Mobilität der Zukunft – Die Rolle der Kunststoffe 16. bis 17. November 2011*. Würzburg.
- IEC. (Dezember 2010). International Standard, IEC 62660-1 Edition 1.0. *International Electrotechnical Commission*. Geneva .
- IG Metall. (2010). *Das E-Qualifizierungssystem ist am Start*. Frankfurt.
- IHK Region Stuttgart. (2010). *Besondere Rechtsvorschriften für die Prüfung "Zusatzqualifikation Fachkraft für elektronische Arbeiten an Hochvolt-Systemen in Fahrzeugen" für Auszubildende im Ausbildungsberuf Kfz-Mechatroniker/-in*. Stuttgart.
- International Energy Agency (IEA). (2010). *Technology Roadmap: electric and plug-in hybrid electric vehicles*.
- Ittermann, P., Abel, J., & Dostal, W. (03 2011). Industrielle Einfacharbeit - Stabilität und Perspektiven. *Arbeit*, S. 157-172.
- Jaksic, D. (2007). Use of Injection Moulding Process to Maximize the Fill Factor of Winding. *Inductica International Conference 2007*. Berlin.
- Jaksic, D. (2011). Get rid of the air, or How to Maximize Winding Fill Factor. *1st International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 122-126). Nürnberg.
- James, B., Kalinoski, J., & Baum, K. (30. September 2010). Mass Production Cost Estimation for Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Automotive Applications. Arlington, Virginia, USA.

- Jörissen, L., & Garche, J. (2000). Brennstoffzellen für den Fahrzeugantrieb. In L. Demuß, J. Garche, G. Hackenjos, L. Jörissen, W. Mannsbart, F. Marscheider-Weidemann, et al., J. Wengel, & E. Schirrmeister (Hrsg.), *Innovationsprozess von Verbrennungsmotor zu Brennstoffzelle* (S. 13-49). Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI).
- Jürgens, U., Loire, P., McKiernan, P., & et al. (2009). *Anticipation of Change in the Automotive Industry. Study 1: Good Practices of Anticipation and Management of Change within Companies and Regions*. Berlin, Paris, St. Andrews.
- Kale, P., & Singh, H. (2009). Managing Strategic Alliances: What we do we know now, and where do we go from here? *Academy of Management Perspectives*, 23(2), 45-62.
- Katenkamp, U. (2011). *Die erste Nationale Bildungskonferenz Elektromobilität in Ulm. Eine persönliche Bilanz*. Bonn.
- Keller, M., Birke, P., Schiemann, M., & Möhrstädt, U. (2009). Lithium-Ionen-Batterie - Entwicklung für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. *ATZelektronik (02/2009)*, S. 17-23.
- Kern, J. (2008). *hycar*. Abgerufen am 11. April 2012 von <http://www.hycar.de/pemfc.htm>
- Kinkel, S., Friedewald, M., Hüsing, B., Lay, G., & Lindner, R. (2008). *Arbeiten in der Zukunft - Strukturen und Trends der Industriearbeit*. Berlin.
- Kleine, O., Kinkel, S., Som, O., Bräunlich, H., & Kräusel, V. (2010). *Zukunftsfähige Technologie- und Innovationsstrategien in hoch spezialisierten Industriegebieten. Eine exemplarische Studie am Beispiel der Umformtechnik in der Region Raststatt/Gaggenau*. Stuttgart.
- Kohnhäuser, M. (2011). Realisierung einer Kleinserienfertigung von Elektromotoren mit innovativen Fertigungstechnologien für den elektrischen Antrieb des BMW ActiveE. In J. Fleischer, G. Lanza, V. Schulze, & (Hrsg.) (Hrsg.), *Produktionstechnische Herausforderungen der Elektromobilität* (S. 106-126). Aachen.
- Kritzer, P., & Nahrwold, O. (2011). Dichtungs- und Fixierelemente für flexible Zellen in großformatigen Lithium-Batterien. *ATZ 06/2011 113. Jahrgang*, S. 474-477.
- Krog, E.-H., & Statkevich, K. (2008). Kundenorientierung und Integrationsfunktion in der Automobilindustrie. In H. Baumgarten, *Das Beste der Logistik, Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Berlin: Springer.
- Kuda, E., Strauß, J., Spöttl, G., & Kaßbaum, B. (2012). *Akademisierung der Arbeitswelt? Zur Zukunft der beruflichen Bildung*. Hamburg.
- Landtag von Baden-Württemberg. (2011). *Gewerbliche Ausbildung und Forschung auf dem Gebiet der Elektromobilität. Drucksache 15/936*. Stuttgart.
- Lang, C. (2008). Braucht Montage Erfahrung? Einleitende Überlegungen. In W. Adami, & et al (Hrsg.), *Montage braucht Erfahrung* (S. 4-11). München.
- Lasher, S. (7. Juni 2010). *Analyses of Hydrogen Storage Materials and On-Board Systems*. Lexington, Massachusetts, USA.
- Lawrence Livermore National Laboratory Project Report. (2005). *Annual Progress Report for the DOE Hydrogen Program*.
- Litz, M. (2011). *Organisation des Elektrobereichs bei ZF. Präsentation bei der Fachtagung Elektromobilität und Arbeitsschutz am 19.05.2011 in Erlangen*.
- Malorny, C., & Linder, M. (2012). Electric mobility - transformation of the powertrain value chain and implications for OEMs and suppliers. In FKFS (Hrsg.), *12. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik am 13./14.03.2012, Tagungsband* (S. 31-50). Stuttgart.
- Marcinkoskia, J., James, B., Kalinoski, J., Benjamin, T., & Kopasz, J. (2011). Manufacturing process assumptions used in fuel cell system cost analyses. *Journal of Power Source*(196), 5282–5292.

- Massachusetts Institute of Technology (MIT). (2008). *On the Road in 2035 - Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions*. Massachusetts, USA.
- Mathoy, A. (9/2010 2010). Grundlagen für die Spezifikation von von E-Antrieben. *MTZ*.
- Matthies, G. B. (12. April 2011). *Zeit Online*. Abgerufen am 5. November 2011 von <http://www.zeit.de/auto/2011-04/bosch-daimler-zulieferer/seite-2>
- McGuire, J., & Dow, S. (2009). Japanes Keiretsu: Past, present, future. *Asia Pacific Journal of Management*, 26(2), 333-351.
- McKinsey & Company. (2010). *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*.
- Meißner, H.-R. (2010). *Dringend gesucht: Längerfristige Szenarien für die Autoindustrie*. Berlin.
- Möbius, F. (2011). Realisation of an Electric Motor Batch production by Innovative Manufacturing Technologies for the BMW ActiveE Electrical Drive. *1st International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 46-51). Nürnberg.
- Möbius, F. (2012). Industrialisation of the electric drivetrain for the BMW ActiveE. In FKFS (Hrsg.), *12. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik am 13./14.03.2012, Tagungsband* (S. 467-477). Stuttgart.
- Möbius, F., & BMW/BPC-Electrification. (2011). Industrialisierung des elektrifizierten Antriebs für den BMW ActiveE. *E-Motive Expertenforum „Elektrische Fahrzeugantriebe“*. Aachen 7./8. September 2011.
- Mori, D., & Hirose, K. (2009). Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*(34), 4569 – 4574.
- Müller, K. (2012). Der Produktionstechnologe - ein smarter Innovationsakteur. In S. e. Pfeiffer (Hrsg.), *Smarte Innovation* (S. 285-297). Wiesbaden.
- Naunheimer, H. (02 2010). Hybrid- und Elektrofahrzeuge: Chancen für Zulieferer. *VDMA-Nachrichten*, S. 16-17.
- Naunheimer, H. (2011). *Innovative Antriebstechnik - was bewegt uns morgen? Präsentation beim Mahr Jubiläums Fachkongress am 22.09.2011 in Göttingen*.
- NPE. (2010). Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Berlin.
- NPE. (2011). *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität*. Berlin.
- NPE-AG 6. (2010). *Ausbildung und Qualifizierung. Zwischenbericht der NPE Arbeitsgruppe 6*. Berlin.
- Olbrich, P. (2006). Innovative Solutions in Film Capacitor Vacuum Coating for advanced automotive Applications. *CARTS Asia 2006 9.-13. October*. Taipei, Taiwan.
- Pfeiffer, H., Busch, D., Schlögl, G., Kochem, K.-H., Dries, T., & Winter, A. (2000). *Patentnr. EP0755779*. Deutschland.
- Pfeiffer, P. (2011). *Elektromobilität: Produktionswandel im Antriebsstrang? Präsentation beim Mahr Jubiläums Fachkongress am 22.09.2011 in Göttingen*.
- Pfeiffer, S. (2007). *Montage und Erfahrung. Warum Ganzheitliche Produktionssysteme menschliches Arbeitsvermögen brauchen*. München.
- Porter, M. (2008). *Wettbewerbsstrategien. Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*. Frankfurt: Campus-Verlag.
- Prognos. (2009). *Qualifizierungsbedarf 2015 und 2030 in Baden-Württemberg*. Basel.
- Puls-Marktforschung. (2011). *Automobilzulieferer im Wandel. Strategien, Geschäftsaussichten, Markttrends*. Nürnberg.
- Ramsayer, R. M., Engler, S., & Schmitz, G. (2011). New Approaches for Highly Productive Laser Welding of Copper Materials. *1st International Conference Electric Drives Production*, (S. 97-101). Nürnberg.

- Rosenkranz, C. (2009). Mobile Speicher elektrischer Antriebsenergie -Lebensdauer und Belastung von Batterien. *Dritte Niedersächsische Energietage - Energie und Mobilität*. Goslar.
- Satyapal, S., Petrovic, J., Read, C., Thomas, G., & Ordaz, G. (13. November 2006). The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements. Washington D.C., USA.
- Schiehlen, T., & Steinbach, M. (2010). *Patentnr. DE102008049852A1*. Deutschland.
- Schlick, T., Hertel, G., Hagemann, B., Maiser, E., & Kramer, M. (2011). *Zukunftsfeld Elektromobilität*.
- Schlick, T., Hertel, Guido, Hagemann, Bernhard, Maiser, Eric, & Kramer, Michael. (2011). *Zukunftsfeld Elektromobilität. Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Frankfurt.
- Schmid, R. (2010). Electric Vehicle Batteries Made in Europe, Lighthouse Projects for EV Batteries Made in Europe, Series Production of Li Ion Batteries:. 30.11.2010.
- Schmidt, S., Pack, J., Schaezle, W., & Staudacher, F. (2002). *Brennstoffzelle - Herausforderung und Chance für das Handwerk*. Aalen.
- Schneider, K. (2011). *Modernes Sourcing in der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Gabler.
- Schulz, P. (1988). *Die Portfolio-Analyse als Instrument der strategischen Planung in industriellen Klein- und Mittelbetrieben: Möglichkeiten, Probleme und Lösungsansätze*. Frankfurt am Main: Lang.
- Schulze, S. (2011). Erfahrungsbericht eines deutschen Batterieherstellers im Bereich Montage. *VDMA Infotag*. Frankfurt am Main, 30.05.2011.
- Schurer, R. (2011). *Batteriemontage und Batteriewechselstationen. Präsentation beim Technologietag 2011 von e-mobil-BW am 7.11.2011 in Stuttgart*.
- Schurer, R. (2011). Paint and Final Assembly Systems - Batteriemontage. *wbk Herbsttagung 2011*. Karlsruhe: Shaker-Verlag.
- Seeberg, M. (2011). *Systemtechniker Elektromobilität (IHK). Präsentation bei der Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität am 29.06.2011 in Ulm*.
- Shell. (2009). *Shell PKW-Szenarien bis 2030: Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*.
- Siebenhüter, S., & Meyer, T. (03 2011). Elektromobilität und Flexibilisierung: Industrielle Wandlungsprozesse am Beispiel der Automobilregion Ingolstadt. *Industrielle Beziehungen*, S. 190-204.
- Sinha, J., & Yang, Y. (9. Juni 2010). Direct Hydrogen PEMFC Manufacturing Cost Estimation for Automotive Applications. Washington D.C., USA.
- Smolik, J. (2011). *Qualifizierung zur Elektrofachkraft Fahrzeugtechnik IHK als Grundlage der Aus- und Weiterbildung der Fachkräfte bei der Audi AG. Präsentation bei der Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität am 29.06.2011 in Ulm*.
- Spath, D., Rothfuss, F., Herrmann, F., Voigt, S., Brand, M., Fischer, S., et al. (2011). *Strukturstudie BWe mobil 2011*. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation.
- Spur, G. (2007). Produktion. In H. Czichos, & M. Hennecke, *HÜTTE - Das Ingenieurwissen* (S. 1566). Berlin: Springer-Verlag.
- Stahlecker, T., Lay, G., & Zanker, C. (2011). *Elektromobilität: Zulieferer für den Strukturwandel gerüstet? Status quo und Handlungsempfehlungen für den Automobilstandort Metropolregion Stuttgart*. Stuttgart.
- Steegmüller, D. (2011). Produktionstechnische Herausforderungen für Alternative Antriebe aus Sicht eines Prozessentwicklers. In J. Fleischer, G. Lanza, & V. (. Schulze (Hrsg.), *Produktionstechnische Herausforderungen der Elektromobilität* (S. 14-31). Aachen.

- Steger, J. (2011). A New Generation of Power Modules with Sinter-Technologie for the Automotive Industry. *1st International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 88-90). Nürnberg.
- Steinberg, I., Müller, E., & Dahl, P. (04 2012). Das Siebengang Mild-Hybrid-Getriebe 7HDT500. *ATZ*, S. 6.
- Strehlitz, M. (2012). Leistungselektronik - Starke Leistung . *VDE dialog - Das Technologie-Magazin, E-Mobility. Hürden und Herausforderungen auf dem Weg in die Zukunft 1/2012*, S. 24-25.
- Stumpf, J. (2010). *Auswirkungen der Elektromobilität auf die Belegschaft. Herausforderungen für Betriebsrat und Management am Beispiel des Volkswagen Werks Kassel. Präsentation beim Forum Elektromobilität am 4.10.2010 in Wolfsburg.*
- Symposium, P. 1. (12 2011). 10. Internationales CTI Symposium und Expo „Innovative Fahrzeug-Getriebe, Hybrid- und Elektro-Antriebe“. Berlin.
- Thomas, P. (02 2010). Chance der Zelle. *Technicity*, S. 40-53.
- Thommen, J., & Achleitner, A. (2001). *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Gabler.
- Vollmer, A. (Dezember 2010). wie entsteht eine Li-Ionen-Batterie. *Automobil-Elektronik*, S. 36-37.
- Wallentowitz, H., & Reif, K. (2011). *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen* (2. Ausg.). Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., & Olschewski, I. (2010). *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*. Wiesbaden.
- Weber, A. (2011). Factory of the Future for Poweelectronics in Hybrid- & Electric Vehicles. *1st International Conference Electric Drives Production 27.-30. September*, (S. 93-96). Nürnberg.
- Wehrhahn, J. (2009). *Kosten von Brennstoffzellensystemen auf Massenbasis in Abhängigkeit von der Absatzmenge*. Jülich: Jülich GmbH.
- Wimmelbücker, S. (23. Januar 2012). *Automobilwoche*. Abgerufen am 26. Januar 2012 von <http://www.automobilwoche.de/article/20120123/repository/120129975>
- Wöstmann, F.-J. (06 2011). Neue Antriebskonzepte und Komponenten für Elektroautos. *Werkstattstechnik online*, S. 456-457.
- Wurster, R. (1997). *Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellensysteme für dezentralen stationären und für mobilen Einsatz*. Ottobrunn.
- Würz, T., & Bell, T. (2009). Zukünftige Veränderungen am Kraftfahrzeug-Antriebsstrang - Auswirkungen auf die Produktionstechnik. Frankfurt am Main.
- Zanker, C., Lay, G., & Stahlecker, T. (2011). *Automobilzulieferer in Baden-Württemberg unter Strom? Perspektiven der Automobilzulieferindustrie für den Übergang zur Elektromobilität*. Karlsruhe.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtete alternative Antriebskonzepte und mögliche Architekturen (Grafik: DLR)	18
Abbildung 2: Antriebsstrang-Architekturen – Hybridfahrzeuge (HEV) (Grafik: DLR)	19
Abbildung 3: Antriebsstrang-Architekturen – Batteriefahrzeuge (BEV) (Grafik: DLR).....	21
Abbildung 4: Masse und Volumen verschiedener Speichersysteme für 100km Reichweite (Hofmann P. , 2010)	27
Abbildung 5: Betrachtete Fahrzeuge der explorativen Marktanalyse (Grafik: DLR).....	30
Abbildung 6: Referenz-Antriebskonzepte 2010 – 2030 (Grafik: DLR)	35
Abbildung 7: Neue, modifizierte und entfallende Komponenten bis 2030 (Grafik: DLR).....	36
Abbildung 8: Erhobene Datenpunkte der veröffentlichten Szenarien (Grafik: DLR).....	44
Abbildung 9: Beobachtbare Unterschiede innerhalb der prognostizierten Marktanteile, differenziert nach ICE, HEV und EV (Grafik: DLR).....	45
Abbildung 10: Ausschnitt aus der Datenbasis: Differenzierung der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge im Zeithorizont bis 2020 (Grafik: DLR)	45
Abbildung 11: Marktanteile des weltweiten Neufahrzeugmarktes im ELAB-Referenzszenario (Grafik: DLR)	47
Abbildung 12: Ableitung von drei Alternativszenarien ausgehend vom Referenzszenario (Grafik: DLR) ...	49
Abbildung 13: Wirkzusammenhänge bei der Herstellung elektrifizierter Antriebsstrangkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)	53
Abbildung 14: Die fünf Hauptkomponenten des Verbrennungsmotors (Grafik: Fraunhofer IAO)	54
Abbildung 15: Endmontage des Verbrennungsmotors aus den Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO).....	55
Abbildung 16: Herstellung der Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)	56
Abbildung 17: Getriebe und betrachtete Hauptkomponenten (Grafik: Fraunhofer IAO)	59
Abbildung 18: Montageprozesse beim Getriebe (Grafik: Fraunhofer IAO)	60
Abbildung 19: Hauptkomponenten in der Getriebeherstellung I (Grafik: Fraunhofer IAO)	60
Abbildung 20: Hauptkomponenten in der Getriebeherstellung II (Grafik: Fraunhofer IAO)	61
Abbildung 21: Vereinfachte Darstellung wesentlicher Prozessschritte und Baugruppen in der Herstellung der elektrischen Maschine (Grafik: Fraunhofer IAO)	65
Abbildung 22: Fertigungs-, Montage- und Prüfverfahren in der Herstellung einer elektrischen Maschine (Grafik: Fraunhofer IAO)	66
Abbildung 23: Wesentliche Prozessschritte in der Statorherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)	67
Abbildung 24: Motortopologien und Wickelverfahren im Bereich elektrischer Maschinen (Grafik: Fraunhofer IAO, in Anlehnung an (Franke, 2011)).....	67
Abbildung 25: Rechteckig-profilierter Drähte mit dicker Drahtausführung (links) und dünner Drahtausführung (rechts) (Jaksic, 2007).....	68
Abbildung 26: Profilierte Drähte, hexagonale Anordnung (Jaksic, 2007)	68
Abbildung 27: Aktuell beforschte Automatisierungslösungen in der Fertigung elektrischer Maschinen (Franke, 2011), (Dobroschke & Kuehl, 2011)	69
Abbildung 28: Wesentliche Prozessschritte in der Rotorherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO).....	70
Abbildung 29: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)	72
Abbildung 30: Das Batteriesystem und dessen Komponenten (Grafik: Fraunhofer IAO, in Anlehnung an (Rosenkranz, 2009))	73
Abbildung 31: Erforderliche Prozessschritte bei der Herstellung des Batteriesystems (Grafik: Fraunhofer IAO).....	74
Abbildung 32: Aufbau eines Bi-Packs (links) und Ausführungsform eines Rahmenkonzepts (rechts) (Busch, 2011), (Kritzer & Nahrwold, 2011)	74
Abbildung 33: Schematische Darstellung eines Zellstacks (Busch, 2011).....	75
Abbildung 34: Manuelles und automatisiertes Einsetzen der Zellmodule (Busch, 2011), (Schmid, 2010) .	77
Abbildung 35: Automatisierte Dichtungsapplikation und Schweißprozesse bei der Batteriedeckelmontage (Busch, 2011), (Keller, Birke, Schiemann, & Möhrstädt, 2009)	78

Abbildung 71: Komponentenproduktionszahlen im BEV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 132

Abbildung 72: Komponentenproduktionszahlen im FCV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO) 133

Abbildung 73: Komponentenproduktionszahlen im ICE-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 133

Abbildung 74: Annahmen Mitarbeiterbedarf (Grafik: Fraunhofer IAO) 135

Abbildung 75: Beispiel Schichtbetrieb (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 136

Abbildung 76: Wahl des Automatisierungsgrads (Grafik: Fraunhofer IAO) 137

Abbildung 77: Wahl des Automatisierungsgrads II (Grafik: Fraunhofer IAO) 138

Abbildung 78: Methodisches Vorgehen am Beispiel der 5 C (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 139

Abbildung 79: Vorgehensweise bei der Bestimmung von Abweichungen des Personalbedarfs (Grafik: Fraunhofer IAO) 141

Abbildung 80: Matrixdarstellung der erarbeiteten Ergebnisse (Grafik: Fraunhofer IAO) 144

Abbildung 81: Zusammenführung der Informationspfade (Grafik: Fraunhofer IAO) 145

Abbildung 82: Darstellung Personalbedarf pro Komponente (Grafik: Fraunhofer IAO) 145

Abbildung 83: Darstellung Gesamtpersonalbedarf (Grafik: Fraunhofer IAO) 146

Abbildung 84: Personalbedarf im Referenzszenario (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 148

Abbildung 85: Prozentuale Verteilung der Personalbedarfe (Grafik: Fraunhofer IAO) 149

Abbildung 86: Prozentuale Verteilung der Mitarbeiterarten (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 150

Abbildung 87: Analyse der direkten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 151

Abbildung 88: Analyse der indirekten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO) 151

Abbildung 89: Analyse der produktionsnahen indirekten Mitarbeiter (Grafik: Fraunhofer IAO) 152

Abbildung 90: Personalbedarf im BEV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO) 153

Abbildung 91: Personalbedarf im FCV-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO) 154

Abbildung 92: Personalbedarf im ICE-Szenario (Grafik: Fraunhofer IAO) 154

Abbildung 93: Vergleich der Gesamtpersonalbedarfe (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 155

Abbildung 94: Personalbedarf beim Annahmenkomplex „Neue Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO) 157

Abbildung 95: Personalbedarf beim Annahmenkomplex „Alte Komponenten“ (Grafik: Fraunhofer IAO) 157

Abbildung 96: Personalbedarf im Annahmenkomplex „Stop-Loss“ (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 158

Abbildung 97: Personalbedarf bei der ausschließlichen ICE-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO) 159

Abbildung 98: Personalbedarf bei der ausschließlichen Mild-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 160

Abbildung 99: Personalbedarf bei der ausschließlichen HEV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO) 161

Abbildung 100: Personalbedarf bei der ausschließlichen REX-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO) 161

Abbildung 101: Personalbedarf bei der ausschließlichen BEV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO) 162

Abbildung 102: Personalbedarf bei der ausschließlichen FCV-Fertigung (Grafik: Fraunhofer IAO) 163

Abbildung 103: Prozesskette „Elektrifizierung des Antriebsstrangs“ 167

Abbildung 104: Auswirkungen des Wandels zum Elektroantrieb auf die Zerspanungszeiten der Antriebsstrang-Komponenten..... 170

Abbildung 105: Ausbildungsberufe „Fahrzeugtechnik (eCar)“ (BMBF, 2011, S. 10, 20) 178

Abbildung 106: Automotive-Cluster Baden-Württemberg: Struktur der Wertschöpfungskette (Grafik: IMU Institut)..... 206

Abbildung 107: Unternehmen aus der Zulieferindustrie in Baden-Württemberg (rund um das Antriebskonzept Verbrennungsmotor) (Grafik: IMU Institut) 207

Abbildung 108: Reorganisation der Wertschöpfungskette – Unternehmensstrategien: Diversifizierung gewinnt bei Zulieferern an Bedeutung (Puls-Marktforschung, 2011)..... 209

Abbildung 109: Wandel in der Automobil- und Zuliefererindustrie (nach (Schneider, 2011))..... 210

Abbildung 110: Strategische Allianzen 212

Abbildung 111: Phasen einer Allianz 212

Abbildung 112: Batterie-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO) 216

Abbildung 113: Elektromotor-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO) 218

Abbildung 114: Leistungselektronik-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO) 220

Abbildung 115: Brennstoffzelle-Unternehmensbeziehungen (Grafik: Fraunhofer IAO) 222

Abbildung 116: Electric Vehicle Industry Alliance 223

Abbildung 117: Beziehungen deutscher Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)..... 224

Abbildung 118: Beziehungen asiatischer Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO) 224

Abbildung 119: Beziehungen amerikanischer Hersteller in der Batterieherstellung (Grafik: Fraunhofer IAO)
..... 225

Abbildung 120: Zusammenfassung der ELAB-Forschungsergebnisse (Quelle: Elektromobilität und
Beschäftigung (ELAB): Abschlusspräsentation) 236

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht E-Maschinen (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2010)	25
Tabelle 2: Bauteilvielfalt Hybridfahrzeuge	31
Tabelle 3: Bauteilvielfalt Batteriefahrzeuge	32
Tabelle 4: Bauteilvielfalt Brennstoffzellenfahrzeuge	33
Tabelle 5: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren	51
Tabelle 6: Übersicht Komponenten Brennstoffzellen-System	88
Tabelle 7: Unterschiede Brutto-/Netto-Personalbedarf	115
Tabelle 8: Referenzszenario	130
Tabelle 9: Referenzszenario (absolut)	130
Tabelle 10: Komponentenmatrix	131
Tabelle 11: Annahmen indirekte Mitarbeiter	134
Tabelle 12: Erforderliche Anwesenheit in Schichten	135
Tabelle 13: Erforderliche Anwesenheit in Schichten II	136
Tabelle 14: Übersicht über Basiskomponenten und deren Spezifikationen	139
Tabelle 15: Rangfolge nach Gesamtpersonalbedarf 2030	156
Tabelle 16: Vor- und Nachteile Keiretsu	225
Tabelle 17: Bauteilanalyse Verbrennungsmotor	252
Tabelle 18: Bauteilanalyse 8-Gang-Automatikgetriebe	253
Tabelle 19: Bauteilanalyse 8-Gang-Hybridgetriebe	254
Tabelle 20: Bauteilanalyse Two-Mode-Getriebe	256
Tabelle 21: Bauteilanalyse Leistungselektronik	258
Tabelle 22: Bauteilanalyse Elektrische Maschine	260
Tabelle 23: Bauteilanalyse Traktionsbatterie (Rundzell-Design)	263
Tabelle 24: Bauteilanalyse Traktionsbatterie (Pouch-Zell-Design)	266
Tabelle 25: Bauteilanalyse Brennstoffzellen-System	270
Tabelle 26: Bauteilanalyse Wasserstoffdruckspeicher	271

13 Anhang

13.1 Bauteilanalysen

Die Bauteilanalysen der identifizierten Hauptsysteme werden im Folgenden abgebildet und umfassen im Einzelnen:

- System Verbrennungsmotor
- System Getriebe
- System Elektrische Maschine
- System Leistungselektronik
- System Batterie
- System Brennstoffzelle

Die Differenzierung zwischen Montage, Eigenfertigung und Zukauf beruht bei allen betrachteten Systemen im Rahmen dieser Studie auf Forschungsannahmen, nicht auf einer strategischen Make-or-Buy-Entscheidung.

13.1.1 Verbrennungsmotor

Subsystem	Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorie
Kurbeltrieb						
	Kurbelwelle		x		Stahl	Schmieden
			x			Grobbearbeiten
			x			Bohren
			x			Wärmebehandeln
			x			Nitrieren
			x			Schleifen
			x			Feinbearbeiten
			x			Rissprüfen
			x			Montieren
			x			Ausrichten
			x			Reinigen/ Prüfen
	Lager			x	Stahl	Schmieden
				x		Fräsen
				x		Härten
	Schwungscheibe			x	Grauguss	Fräsen
				x		Gießen
	Pleuel		x		Stahl	Schmieden
			x			Vergüten
			x			Reinigungsstrahlen
			x			Rissprüfen
			x			Schleifen
			x			Spindeln
			x			Bohren
			x			Ankerben
			x			Cracken
			x			Montieren
			x			Fertigschleifen
			x			Reinigen/ Prüfen
	Pleuellager			x	Aluminium/ Bi-Metall	
	Kolben		x		Gussaluminium	Gießen
			x			Polieren
			x			Bohren
			x			Fräsen
	Kolbenringe			x	Stahl	Biegen
				x		Härten
				x		Beschichten
Kurbelgehäuse						
	Motorblock		x		Grauguss	Gießen
			x			Glühen

			x			Bohren
			x			Fräsen
	Leiterrahmen			x	Gussaluminium	
	Ölwanne			x	Stahl	Tiefziehen
				x		Lackieren
	Laufbuchse			x	Gussaluminium	Hohnen
				x		Strangpressen
				x		Polieren
Zylinderkopf						
	Zylinderkopfabdeckung			x	Kunststoff	
	Zylinderkopf		x		Grauguss	Gießen
			x			Grobbearbeiten
			x			Montage
			x			Feinbearbeiten
			x			Reinigen/ Prüfen
	Ventilführung			x	Messinglegierung	
	Zylinderkopfdichtung			x	Stahl/ Elastomer	Stanzen
				x		Kleben
	Nockenwelle		x		Stahl	Schmieden/ Gießen
			x			Wärmebehandeln
			x			Fräsen
			x			Bohren
			x			Schleifen
			x			Richtpressen
			x			Reinigen/ Prüfen
	Ventile			x	Stahl	Schmieden
				x		Polieren
	Tassenstößel			x	Stahlguss	Gießen
				x		Schleifen
				x		Polieren
	Federn			x	Stahl	
	Steuerriemen			x	Gummifaser	Stanzen
	Montage Rumpfmotor	x				
	Montage Zylinderkopf	x				
	Endmontage	x				
	Endprüfung	x				

Tabelle 17: Bauteilanalyse Verbrennungsmotor

13.1.2 8-Gang-Automatikgetriebe

Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfer- tigung	Zukauf	Fertigungskategorien	
				Werkstoff	
Schalthebel			x	Aluminium/ Kunststoff	
Pumpenrad		x		Stahl	Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Schweißen
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Turbinenrad		x		Stahl	Gießen/ Stanzen
		x			Grobbearbeiten
		x			Feinbearbeiten
		x			Auswuchten
		x			Reinigen/ Prüfen
Leitrad		x		Stahl	Pressen
		x			Schweißen
Wandlergehäuse		x			Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Überbrückungskupplung			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Lamellenkupplung (3x)			x	Sintermetall	Umformen
			x		Drückwalzen
			x		Wärmebehandeln
			x		Reinigen/ Prüfen
Bremse (2x)			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Planetenradsätze (4x)		x		Stahl	Schmieden
		x			Grobbearbeiten
		x			Wärmebehandeln
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Lager			x	Stahl	
Wellen		x		Stahl	Schmieden/ Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Wärmebehandeln
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Ölpumpe			x	Stahl	
Mechatronik			x	Stahl/ Elektronik	
Getriebegehäuse		x		Gussaluminium	Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Vormontage	x				
Endmontage	x				
Endprüfen	x				

Tabelle 18: Bauteilanalyse 8-Gang-Automatikgetriebe

13.1.3 8-Gang-Hybridgetriebe (E-Maschine separat betrachtet)

Komponente	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Fertigungskategorien	
				Werkstoff	Fertigungskategorien
Schalthebel			x	Aluminium/ Kunststoff	
Zweimassenschwungrad		x		Stahl	Pressen
		x			Stanzen
		x			Nieten
Trennkupplung			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Lamellenkupplung			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Lamellenbremse			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Planetenradsätze		x		Stahl	Schmieden
		x			Grobbearbeiten
		x			Wärmebehandeln
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Lager			x	Stahl	
Wellen		x		Stahl	Schmieden/ Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Wärmebehandeln
		x			Feinbearbeiten
Hydraulikölpumpe			x	Stahl	
Mechatronik			x	Stahl/ Elektronik	
Getriebegehäuse		x		Gussaluminium	Gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen/ Prüfen
Vormontage	x				
Endmontage	x				
Endprüfen	x				

Tabelle 19: Bauteilanalyse 8-Gang-Hybridgetriebe

13.1.4 Two-Mode-Getriebe

Komponente	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
Schalthebel			x	Aluminium/ Kunststoff	
Zweimassenschwungrad		x		Stahl	Pressen
		x			Stanzen
		x			Nieten
Trennkupplung			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Lamellenkupplung			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Lamellenbremse			x	Sintermetall	Stanzen
			x		Nieten
Planetenradsätze		x		Stahl	Gießen
		x			Walzfräsen
		x			Härten
		x			Schleifen
Lager			x	Stahl	
Wellen		x		Stahl	Drehen
		x			Härten
		x			Entgraten/ Schleifen
Hydraulikölpumpe			x	Stahl	
Mechatronik			x	Stahl/ Elektronik	
Getriebegehäuse		x		Gussaluminium	Gießen
		x			Fräsen
		x			Bohren
		x			Schleifen
Synchron-Elektromotoren (2x)		x			2 separate Elektromotoren:
		x			Bürstenlos, 3-Phasen- Drehstrommotor mit Permanentmagneten
		x			Motor 1: 67 kW / 260 Nm, max. Drehzahl 10.680 rpm
		x			Motor 2: 63 kW / 280 Nm, max. Drehzahl 13.500 rpm
		x			in IPM-Bauweise (Permanentmagnete im Blechpaket eingebettet)
Innenrotor		x		Bleche	Stanzen, Aufschichten
Permanentmagnete			x		
			x		kleben
			x		bandagieren
			x		wuchten
			x		vergießen
Außenstator mit Wicklungen		x		Bleche	

		x			Bleche stanzen, paketieren
		x			Nuten isolieren
		x			Stirnflächen isolieren
		x			Wickeln
		x			Lackieren
Lager			x		
Gehäuse		x		Aluminiumdruckguss	Entgraten
		x			Reinigen
		x			Spanen
	x				Lager montieren
	x				Stator montieren
	x				Rotor montieren
	x				Endtest

Tabelle 20: Bauteilanalyse Two-Mode-Getriebe

13.1.5 Leistungselektronik

Subsystem	Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
Leistungsmodul		x				
	IGBTs			x		Aktivieren
				x		Chemisches/ galvanisches Kupfer Beschichten
				x		Maskieren
				x		Kupfer Beschichten
				x		Entwickeln
				x		Ätzen
	DCB			x		Produktion Keramiksubstrat
				x		Kupfer Beschichten
	Bodenplatte		x			Sägen
			x			Fräsen
			x			Schleifen
			x			Reinigen
	Gehäuse		x		Kunststoff	Kunststoffspritzgießen Gehäusebauteile
		x				Montieren Steckverbindungen
		x				Einpressen Gewindeeinsätze
	Montage Leistungsmodul	x				Löten IGBTs, Dioden und DCB
		x				Verschweißen Bond-Drähte mit IGBTs
		x				Kleben/ Löten DCB und Bodenplatte
		x				Montage Plastikgehäuse
		x				Auffüllen mit Silikongel
Kondensator	Kondensator			x		Schneiden Membran
				x		Wickeln Anoden- und Kathodenfolie
				x		Imprägnieren
				x		Anbringen Anschlussbahnen
				x		Montieren Wicklungen in Gehäuse
				x		Verschließen Gehäuse
				x		Isolieren
Steuerungselekt.	Steuerungselekt.			x		Verkleben Kunststoffbodenplatte mit Kupferfolie
				x		Stanzen PCBs Kontur, Löcher und Leiterbahnen
				x		Löten elektr. Bauteile
				x		Installation Software
Gehäuse	Gehäuse		x		Aluminium	Druckgießen

			x			Fräsen
			x			Bohren
			x			Reinigen
		x				Montage EMV-Schirm, Anschlüsse und Gehäuse
	Endmontage Leistungs-elektronik	x				Fixieren Leistungsmodul im Gehäuse
		x				Montage Zwischenkondensatoren
		x				Montage Steuerungselektronik in Gehäuse
		x				Verschließen Gehäuse und Abdichten
		x				Finales Testen

Tabelle 21: Bauteilanalyse Leistungselektronik

13.1.6 Elektrische Maschine

Komponente	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
Dauermagnet-Synchronmaschine		x			
Rotor		x		Bleche	
		x			Erstellen Blechpaket:
		x			Bleche stanzen
		x			Aufschichten/ richten
		x			Fügen: Verbinder einziehen, Fixieren, Verschweißen, Verstanzen
		x			Fertigung Rotorwelle:
		x			Schmieden/ gießen
		x			Grobbearbeiten
		x			Wärmebehandeln
		x			Feinbearbeiten
		x			Reinigen
		x			Rundlauf prüfen
		x			Rotorwelle/ Bleche verpressen
		x			Qualität optimieren:
		x			Bandagieren
		x			Ggfs. Korrosionsschutz
		x			Prüfen und Wuchten:
		x			Test/ Messung
		x			Auswuchten
		x			Finaler Test und Messung
Magnete			x		
			x		Positionieren
			x		Kleben
			x		Bandagieren
			x		Wuchten
			x		Vergießen
			x		Aushärten
Stator		x		Bleche	
		x			Erstellen Blechpaket:
		x			Bleche stanzen
		x			Aufschichten/ richten
		x			Fügen: Verbinder einziehen, Fixieren, Verschweißen, Verstanzen
		x			Nuten isolieren:
		x			Wicklungsenden anlegen
		x			Isolierpapier schneiden und falzen
		x			Isolationsfolie einziehen in Nuten
		x			Ggf. Epoxy/Pulver Beschichtung Stirnflächen
		x			Wickeln:
		x			Draht wickeln
		x			Drahtenden schneiden
		x			Ggfs. Zwischen-Fixierung

		x			Wicklungen einziehen
		x			Einbringen Lagenisolierung, Deck- schieber
		x			Schalten:
		x			Bündeln der Phasen
		x			Wicklungsenden anlegen
		x			Abisolierung
		x			Kontaktierung
		x			Kontaktierung isolieren
		x			Formen:
		x			Richten der Kabel
		x			Fertigpressen, Formen
		x			Bandagieren Wickelkopf
		x			Prüfen:
		x			Widerstände prüfen
		x			Isolation prüfen
		x			Stoßentladung / Teilentladung
		x			Qualität optimieren:
		x			Wicklungen Fixieren
		x			Imprägnierung
		x			Aushärtung im Ofen
Lager			x		
Gehäuse		x		Aluminiumdruckguss	Entgraten
		x			Ausdrehen
		x			Zentrierränder für Lager
		x			Bohren Gewinde
		x			Reinigen
Montage Stator	x				
	x				Ggfs. Kühlmantel anbringen
	x				Befestigen Stator
	x				Vorbereitung Hochvolt- Kontaktierung
	x				Test
Montage Rotor	x				Lager einsetzen
	x				Welle einfahren
	x				Befestigung
	x				Endtest
Endmontage	x				Integration Temperatur-Sensor
	x				Integration Lage-Sensoren
	x				Montieren Klemmkanten
	x				Anschluss Stecker/Sonstiges
	x				Schließen Gehäuse
Endprüfung	x				Wirkungsgradmessung
	x				Leistungsmessungen
	x				Ggfs. Körper oder Luftschall- messungen, Dichtigkeitstest
	x				Funktionstest
	x				Elektrischer Abschlusstest

Tabelle 22: Bauteilanalyse Elektrische Maschine

13.1.7 Traktionsbatterie (mit Batterien im Rundzell-Design)

Subsystem	Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
Batterie-Stack		x				
	Batterie-Zelle			x		
	Elektroden			x		Aufarbeitung Rohmaterialien
				x		Coating
				x		Mischen mit Bindern, Kathoden- und Anodenaktivmaterial als Paste
				x		Aufbringen auf Metallfolie
				x		Anrollen
				x		Pressen
				x		Trocknen
	Separator			x		Herstellung des Separators
	Elektrolyt			x		Herstellung des Elektrolyts
	Zellgehäuse			x	Stahl	Tiefziehen, Aufweiten des Becherrandes
	Zellverschluss			x	Stahl/ Kunststoff	Einlegen Gummidichtung
				x		Verschweißen mit Lochscheibe
				x		Clipsen des Kunststoff-rings
	Stromableiter			x		
	Assemblieren Zell-Stack	x				Wickeln (Aufdrehen) von Elektroden und Separatoren
		x				Einführen des Wickels in Stahlbecher
		x				Elektrolytbefüllung
		x				Verschweißen Zellverschluss
		x				Eindrücken Zellverschluss
		x				Gasdichtes Verschließen
		x				Reinigen
	Aufladen Zellen	x				
	Testen/ Prüfen Module	x				
Aufbau Module & Integration System: Keine verifizierten Daten verfügbar, Orientierung an Pouch-Batterie-System						
Sub-Modul						

	Übernahme Zellen aus Container		x			
	Inspektion/ Test Zellen		x			
	Positionierung Zellen in Wandung/ Zellrahmen		x			
	Kühlapparat/ Behälter		x			
	Druckplatte		x			
	Verdampferplatte		x			
	Wärmeleitelemente			x		
	Kühlstruktur Kühlleitung			x		
	Mechanische Verbinder			x		
Modul-einheit						
	Stapelung Zellstacks		x			
	Mechanische Verbindung		x			
	Integration in Modulgehäuse/ Cover		x			
	Einsetzen Kühlelemente		x			
	Montage Kühlelemente	x				
	Cell Supervising Electronic (CSE) einsetzen		x			
	CSE montieren	x				
	CSE kontaktieren			x		
	Zell-Spannungsüberwachung			x	Platine	
	Zell-Balancierung			x	Platine	
	Bus Bar, Flexboard, BMS-CAN			x		
	Control Electronics			x		
	PMB Board			x		
	Sicherungen			x		
	Schalter/Schütze			x		
	Interconnect Cover			x		
	Test/ Validierung			x		
	End-of-Line-Test			x		
	Transport Moduleinheiten			x		
Batterie-system			x			
	Gesamtgehäuse, Batterietrog		x			
	Bodenplatte/Träger		x		Stahlblech	Scherschneiden/ Stanzen
			x			Bohren

			x			Zugdruckumformen
			x			Reinigen
			x			Beschichten
	Anschlussplatte		x			
	Rahmen		x		Stahl	
			x			Zugdruckumformen
	Montageplatte		x		Stahl/ Aluminium	Scherschneiden/ Stanzen
			x			Bohren
	Anschlüsse für Kühlmedium			x		montieren
	Kühlmittel Verrohrung	x			Stahlrohre	fertigen und montieren
	Elektrische Verbindungen, Hochspannungsanschluss			x		montieren
	Kabel			x		
	Metallische Leitungsverbinder			x		
	Elektrische Isolation			x		
	Hauptschütz			x		
	Montieren der Module auf Systemtrog	x				schrauben
	Strommonitoring			x	Platine Platine	
	Thermische Überwachung			x		
	Testen/ Prüfen des Batteriesystems	x				elektrisches Testen/ Prüfen
	Finale Tests	x				
	Endmontage	x				
	Software-Flashing	x				
	Verifikation End-of-Line-Test	x				

Tabelle 23: Bauteilanalyse Traktionsbatterie (Rundzell-Design)

13.1.8 Traktionsbatterie (mit Batterien im Pouch-Zell-Design)

Subsystem	Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Material	Fertigungskategorien
Batterie-Stack		x				
	Batterie-Zelle			x		
	Elektroden			x		Aufarbeitung Rohmaterialien
				x		Coating
				x		Mischen mit Bindern, Kathoden- und Anodenaktivmaterial als Paste
				x		Aufbringen auf Metallfolie
				x		Anrollen
				x		Pressen
				x		Trocknen
	Separator			x		Herstellung des Separators
	Elektrolyt			x		Herstellung des Elektrolyts
	Folienpackung			x	Aluminium/ Kupfer	Herstellung von Folien als Stromsammler und Elektrodengrundlage
	Abstand-/ Klemmrahmen		x		Stahl/ Kunststoff	Strangpressen (Profil)
			x			Sägen oder Abschneiden
	Modulrahmen		x		Aluminium	
	Stromableiter			x		
	Assemblieren Zell-Stack	x				Wickeln oder Stapeln von Elektroden und Separatoren
		x				Einsetzen, schrauben, verspannen in Alurahmen
		x				Siegeln der Batteriepackung
		x				Stanzen
		x				Ausrichten und Einsetzen in Halterungen
		x				Elektrolytbefüllung
		x				Vakuumverschließen
	Aufladen Zellen	x				
	Testen/ Prüfen Module	x				
Sub-Modul						

	Übernahme Zellen aus Container		x			
	Inspektion/ Test Zellen		x			
	Positionierung Zellen in Wandung/ Zellrahmen		x			
	Kühlapparat/ Behälter		x			
	Druckplatte		x			
	Verdampferplatte		x			
	Wärmeleitelemente			x		
	Kühlstruktur Kühlleitung			x		
	Mechanische Verbinder			x		
Modul-einheit						
	Stapelung Zellstacks		x			
	Mechanische Verbindung		x			
	Integration in Modulgehäuse/ Cover		x			
	Einsetzen Kühlelemente		x			
	Montage Kühlelemente	x				
	Cell Supervising Electronic (CSE) einsetzen		x			
	CSE montieren	x				
	CSE kontaktieren			x		
	Zell-Spannungsüberwachung			x	Platine	
	Zell-Balancierung			x	Platine	
	Bus Bar, Flexboard, BMS-CAN			x		
	Control Electronics			x		
	PMB Board			x		
	Sicherungen			x		
	Schalter/ Schütze			x		
	Interconnect Cover			x		
	Test/ Validierung			x		
	End-of-Line-Test			x		
	Transport Moduleinheiten			x		
Batterie-system			x			
	Gesamtgehäuse, Batterietrog		x			
	Bodenplatte/ Träger		x		Stahlblech	Scherschneiden/ Stanzen
			x			Bohren

			x			Zugdruckumformen
			x			Reinigen
			x			Beschichten
	Anschlussplatte		x			
	Rahmen		x		Stahl	
			x			Zugdruckumformen
	Montageplatte		x		Stahl/ Aluminium	Scherschneiden/ Stanzen
			x			Bohren
	Anschlüsse für Kühlmedium			x		montieren
	Kühlmittel Verrohrung	x			Stahlrohre	fertigen und montieren
	Elektrische Verbindungen, Hochspannungsanschluss			x		montieren
	Kabel			x		
	Metallische Leitungsverbinder			x		
	Elektrische Isolation			x		
	Hauptschütz			x		
	Montieren der Module auf Systemtrog	x				schrauben
	Strommonitoring			x	Platine Platine	
	Thermische Überwachung			x		
	Testen/ Prüfen des Batteriesystems	x				elektrisches Testen/ Prüfen
	Finale Tests	x				
	Endmontage	x				
	Software-Flashing	x				
	Verifikation End-of-Line-Test	x				

Tabelle 24: Bauteilanalyse Traktionsbatterie (Pouch-Zell-Design)

13.1.9 Brennstoffzellen-System

Subsystem	Komponente/ Vorgang	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
BZ-Stack		x				
	Bipolarplatten, graphitisch		x		Kunstharz, Grafit, Kugelgrafit	Flachspan behandeln
			x			Spülen
			x			Dehnen
			x			Folie pressen
			x			Harz imprägnieren
			x			Kalandrieren
			x			Formpressen
			x			Scheren
			x			Aushärten
	Oder Bipolarplatten, metallisch		x		Fe20 Cr4 V Folie	Stanzen (7 Stage Progressive Die)
			x			Schweißen
			x			Nitridierung
	Dichtungen			x		Transferpressen
	Membran-Elektroden-Einheit			x		
	Anode			x		
	Teflonschicht			x		Heißbeschichtung
	Katalysatorschicht			x	Kohlenstoffpartikel	Heißbeschichtung
	Gasdiffusionsschicht			x	Graphitfaser	Heißbeschichtung
	Kathode			x		
	Teflonschicht			x		Heißbeschichtung
	Katalysatorschicht			x	Kohlenstoffpartikel	Heißbeschichtung
	Gasdiffusionsschicht			x	Graphitfaser	Heißbeschichtung
	Nafionmembran			x		Heißbeschichtung
				x		PTFE-Schicht abschälen
	Zellrahmen			x	Kunststoff	Spritzguss
	MEA stanzen			x		
	Rahmendichtungen umspritzen			x		
	Endplatten (x2)		x		Aluminium	z.B. faserverstärkter Kunststoff
			x			Schwerkraftgießen
			x			Bohren, Senken, Reiben
			x			Fräsen
			x			Beschichten (Gold)
			x			Gewindeschneiden
	Gehäuse für Stackmodul		x		Stahlblech, Alublech, Kunststoff	
	Verrohrung		x			
	Bolzen			x		
	Stromkollektoren			x	Aluminium/ Kupfer	

	Isolatorplatten		x		Kunststoff	Stanzen, Schneiden
	Zusammenbau Stack-modul	x				
	Auflegen, Aufsetzen, Schichten ("Filterpressanordnung")	x				
	Schrauben, Verspannen	x				
	Zellen einzeln aufbauen, kleben,	x				
	alternativ: Kassetten-technik	x				
	Zellspannungsmessung (VMU - Voltage measurement unit)	x				
	Qualitätskontrolle Stack	x				
	Konditionierung Stack	x				
Brennstoff-versorgung		x				
	Druckregler (Druckregelventil)			x		
	Rezirkulationsgebläse (H2-Gebläse)	x				
	Endplatte (Motor-seitig)		x			Sandguss
			x			Drehen
			x			Bohren
	Gehäuse		x			Sandguss
			x			Drehen
			x			Bohren
	Saugrohr		x			Pulvermetallurgie
	Auslassverteiler			x		Pulvermetallurgie
	Endplatte		x			Sandguss
			x			Drehen
			x			Bohren
	Welle		x			Drehen
			x			Fräsen
			x			Wärmebehandlung
			x			Schleifen
	Rotor		x		Aluminium	Gießen
			x			Drehen
			x			Fräsen
			x			Räumen
	Schaufel		x			Warmschmieden
			x			Bohren
			x			Reiben
	Montage Rezirkulationsgebläse	x				
	Rezirkulationspumpe (el. Vakuum H2-Ejektor)			x		
	Montage Rezirkulationspumpe	x				
	Rückschlagventil			x		
	Sicherheitsventile			x		
	Verrohrung		x		nahtlose Stahlrohre	
	Wasser-/ Tropfenab-			x		

	scheider					
	Purgeventil			x		
	Sensoren			x		
	Drucksensoren			x		
	Temperatursensoren			x		
	Wasserstoffsensoren			x		
	Durchflussmesser			x		
Luftversorgung		x				
	Luftfilter	x				
	Filter			x		
	Gehäuse			x	Kunststoff	Kunststoff-Spritzguss
	Kompressor-Expander-Modul	x				
	Elektromotor			x		
	Stator			x		
	Rotor			x		
	Motorregelungseinheit			x		
	Verstellbare Leitschaufel			x		
	Gehäuse		x		Aluminium	Sandguss
			x			Drehen
			x			Bohren
	Turbine			x		
	Kompressor			x		
	Ladeluftkühler			x		
	Gasverteiler			x		
	Sensoren			x		
	Luftmassestromsensoren			x		
	Drucksensoren			x		
	Feuchtesensoren			x		
Wärme-management		x				
	Kühler			x		
	Lamellen		x		Lamellen herstellen	
	Rahmen		x		Stanzen	
	Ausgleichbehälter		x		Stanzen	
	Core Headers			x	Stanzen	
	Montage Kühler	x				
	Hartlöten (CAB) Kühler	x			Hartlöten (CAB)	
	Elektrostatische Lackierung Kühler	x				
	Lecktest Kühler	x				
	Verpackung Kühler	x				
	Kühlmittelpumpe			x		
	Kühlmittelregelventil			x		
	Deionisierungspatrone			x		
	Ausgleichsbehälter			x		
	Druckventile			x		
	Kühlerlüfter			x		
	Thermostat			x		
	Verrohrung		x			
	Sensoren			x		
	Temperatursensor			x		

	Leitfähigkeitssensor			x		
	Drucksensoren			x		
Wasser- management		x				
	Wasser-/ Tropfenab- scheider			x		
	Wasserfilter			x		
	Wärmetauscher			x		Cordierit extrudieren
				x		Trocknen
				x		Zünden
				x		Beschichten
				x		Zünden
				x		Polieren, Läppen
	Montage Wärmetau- scher	x				
	Dichtung			x	Teflon	Spritzguss
	Verteiler			x	Aluminium	
	Motor, Antriebswelle, Lager, etc.		x			
	Prüfung Wärmetauscher	x				
	Verpackung Wärmetau- scher	x				
	Membran- Befeuchtungseinheit	x				
	Gehäuse			x	Kunststoff- Spritzguss	
	Nafionmembran			x		
	Patronen (Tubes)			x		Nafion in Rohre extrudieren
				x		Wasserbad
				x		2-schrittige chemi- sche Umwandlung
				x		Maßkontrolle (Laser)
				x		Rundlaufprüfung
				x		Wicklung
				x		Rohrbündel einbe- tonieren (Po- lyurethan)
				x		Einbau in Noryl- Gehäuse
				x		Schneiden der Rohr- enden
	Endmontage Befeuch- tungseinheit	x				
	Prüfung Befeuchtungs- einheit	x				
	Verpackung Befeuch- tungseinheit	x				
	Verrohrung		x			
BZ-System		x				
	Trägerplatte		x		Stahlblech	
	Gehäuse mit Kühlrippen		x		Alu-Druckguss	
	Montage BZ-System	x				Schrauben

Tabelle 25: Bauteilanalyse Brennstoffzellen-System

13.1.10 Wasserstofftank

Komponente	Montage	Eigenfertigung	Zukauf	Werkstoff	Fertigungskategorien
Behälter, CFK, gewickelt		x			Polymere Auskleidung vorspannen
		x			Auskleidung beschichten (Gelcoat)
		x			Kohlefaser wickeln
		x			Aushärten/ Kühlen
		x			Röntgen/ Computertomographie
		x			Ultraschallprüfen
		x			Glasfaser wickeln
		x			Aushärten/ Kühlen
		x			Endkappen montieren
		x			Druckprüfen
		x			Maß-/ Gewichtsprüfen
		x			Luftreinigen
Drucksensor			x		
Temperatursensor			x		
Sicherheitsventil			x		
Betankungsstutzen			x		
Druckminderer			x		
Leitungen		x			
Montage System H2-Druckspeicher	x				

Tabelle 26: Bauteilanalyse Wasserstoffdruckspeicher

13.2 Systeme der Referenz-Fahrzeuge

13.2.1 Systeme des Referenz-Fahrzeugs ICE 2030

- **Verbrennungsmotor**
- Luftversorgung:
 - Luftfilter
 - Gehäuse
 - Filter
 - Ladeluftkühler
 - Luftmengenmesser
 - Ansaugbrücke
 - Turbolader
- Abgasanlage:
 - Lambdasonde
 - Krümmer
 - Dichtung
 - Katalysator
 - Träger
 - Gehäuse/ Ummantelung
 - Partikelfilter
 - Vorschalldämpfer
 - Endtopf
 - Abgasrückführung
- Einspritzanlage:
 - Einspritzdüse
 - Kraftstoffpumpe (Hochdruck)
- Zündanlage:
 - Zündkerze
 - Zündverteiler
- Motorsteuergerät
- Starter-Generator:
 - Kupferdraht
 - Neodymmagneten
- **Getriebe** (8-Gang-Automatikgetriebe)
- Kardanwelle:
 - Welle
 - Lager
 - Hardischeibe
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- Kraftstofftank:
 - Kraftstofftank
 - Deckel
 - Kohlefilter
 - Schläuche
 - Schwimmer
 - Kraftstoffpumpe

13.2.2 Systeme des Referenz-Fahrzeugs Mild-HEV 2030

- **Verbrennungsmotor**
- Luftversorgung:
 - Luftfilter
 - Gehäuse
 - Filter
 - Ladeluftkühler
 - Luftmengenmesser
 - Ansaugbrücke
 - Turbolader
- Abgasanlage:
 - Lambdasonde
 - Krümmer
 - Krümmer
 - Dichtung
 - Katalysator
 - Träger
 - Gehäuse/ Ummantelung
 - Partikelfilter
 - Vorschalldämpfer
 - Endtopf
 - Abgasrückführung
- Einspritzanlage:
 - Einspritzdüse
 - Kraftstoffpumpe (Hochdruck)
- Zündanlage:
 - Zündkerze
 - Zündverteiler
- Motorsteuergerät
- Starter-Generator:
 - Kupferdraht
 - Neodymmagneten
- **Getriebe**
 (*8-Gang-Hybridgetriebe, integrierte elektrische Maschine separat betrachtet*)
- Kardanwelle:
 - Welle
 - Lager
 - Hardischeibe
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- Kraftstofftank:
 - Kraftstofftank
 - Deckel
 - Kohlefilter
 - Schläuche
 - Schwimmer
 - Kraftstoffpumpe
- **Traktionsbatterie** (*mit Batterien im Rundzell-Design*)
- **Leistungselektronik**

13.2.3 Systeme des Referenz-Fahrzeugs Full-/ Plug-In-HEV 2030

- **Verbrennungsmotor**
- Luftversorgung:
 - Luftfilter
 - Gehäuse
 - Filter
 - Ladeluftkühler
 - Luftmengenmesser
 - Ansaugbrücke
 - Turbolader
- Abgasanlage:
 - Lambdasonde
 - Krümmer
 - Krümmer
 - Dichtung
 - Katalysator
 - Träger
 - Gehäuse/ Ummantelung
 - Partikelfilter
 - Vorschalldämpfer
 - Endtopf
 - Abgasrückführung
- Einspritzanlage:
 - Einspritzdüse
 - Kraftstoffpumpe (Hochdruck)
- Zündanlage:
 - Zündkerze
 - Zündverteiler
- **Getriebe:**
 - *8-Gang-Hybridgetriebe (mit integrierter elektrischer Maschine)*
 - *Two-Mode-Getriebe (mit integrierter elektrischer Maschine)*
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- Kraftstofftank:
 - Kraftstofftank
 - Deckel
 - Kohlefilter
 - Schläuche
 - Schwimmer
 - Kraftstoffpumpe
- **Traktionsbatterie** *(mit Batterien im Pouch-Zell-Design)*
- **Leistungselektronik**

13.2.4 Systeme des Referenz-Fahrzeugs REX 2030

- **Verbrennungsmotor**
- Luftversorgung:
 - Luftfilter
 - Gehäuse
 - Filter
 - Ladeluftkühler
 - Luftmengenmesser
 - Ansaugbrücke
- Abgasanlage:
 - Lambdasonde
 - Krümmer
 - Krümmer
 - Dichtung
 - Katalysator
 - Träger
 - Gehäuse/ Ummantelung
 - Partikelfilter
 - Vorschalldämpfer
 - Endtopf
- Einspritzanlage:
 - Einspritzdüse
 - Kraftstoffpumpe (Hochdruck)
- Zündanlage:
 - Zündkerze
 - Zündverteiler
- Getriebe:
 - 2-Stufen Automatik
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- Kraftstofftank:
 - Kraftstofftank
 - Deckel
 - Kohlefilter
 - Schläuche
 - Schwimmer
 - Kraftstoffpumpe
- **Elektrische Maschine**
- **Traktionsbatterie (Pouch-Zell-Design)**
- **Leistungselektronik**

13.2.5 Systeme des Referenz-Fahrzeugs BEV 2030

- Getriebe:
 - 2-Stufen Automatik
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- **Elektrische Maschine**
- **Traktionsbatterie (Pouch-Zell-Design)**
- **Leistungselektronik**

13.2.6 Systeme des Referenz-Fahrzeugs FCV 2030

- **Brennstoffzellen-System**
- **Wasserstofftank**
- Getriebe:
 - 2-Stufen Automatik
- Hinterachsgetriebe:
 - Zahnräder
 - Lager
 - Gehäuse
- Seiten-/ Gelenkwellen:
 - Welle
 - Lager
 - Manschetten
- **Elektrische Maschine**
- **Traktionsbatterie (Pouch-Zell-Design)**
- **Leistungselektronik**

Der langfristige Wandel zur Elektromobilität stellt die Automobilindustrie vor enorme Herausforderungen. Insbesondere werden Wirkungen auf Beschäftigung, auf Personal- und Arbeitspolitik, auf Unternehmenskonzepte und auf die Wertschöpfungskette erwartet.

Im Rahmen von ELAB findet eine Analyse dieser quantitativen und qualitativen Wirkungen am Beispiel einer idealtypischen Automotive-Antriebsstrangproduktion statt.