

JOACHIM FRÖSCHL, OTTMAR SIRCH

Bordnetze und E/E-Architektur

Eine Einführung in die
Zusammenhänge zwischen
Elektrik/Elektronik-Architektur
und Energiebordnetz im Automobil

Joachim Fröschl / Ottmar Sirch

Bordnetze und E/E-Architektur

Eine Einführung in die Zusammenhänge zwischen Elektrik/
Elektronik-Architektur und Energiebordnetz im Automobil

Umschlagabbildung: © Dr. Joachim Fröschl und Ottmar Sirch

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

DOI: <https://doi.org/10.24053/9783816985327>

© 2023 expert verlag

- ein Unternehmen der Narr Francke Attempto Verlag GmbH + Co. KG

Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen. Diese Publikation enthält gegebenenfalls Links zu externen Inhalten Dritter, auf die weder Verlag noch Autor:innen oder Herausgeber:innen Einfluss haben. Für die Inhalte der verlinkten Seiten sind stets die jeweiligen Anbieter oder Betreibenden der Seiten verantwortlich.

Internet: www.expertverlag.de

eMail: info@verlag.expert

CPI books GmbH, Leck

ISBN 978-3-8169-3532-2 (Print)

ISBN 978-3-8169-8532-7 (ePDF)



Vorwort

Das elektrische Energiebordnetz ist ein wesentlicher Bestandteil der E/E-Architektur eines Kraftfahrzeugs und bildet gemeinsam mit dem physischen Bordnetz die technische E/E-Architektur ab, in Ergänzung zur logischen E/E-Architektur. Die Bedeutung des Energiebordnetzes hat im Laufe der letzten drei Dekaden stetig zugenommen, so dass es heute eine der Schlüsseltechnologien in der E/E-Systemgestaltung darstellt. Es leistet einen ganz entscheidenden Beitrag zur energetischen Effizienz der Fahrzeuge im Hinblick auf CO₂-Emissionen und/oder elektrische Reichweite und muss für zukünftige Systeme wie z. B. autonomes Fahren eine sichere und fehlertolerante Stromversorgung gewährleisten.

Das Fachbuch wendet sich an Studentinnen und Studenten verschiedener Ingenieur- und Wirtschaftsingenieurwissenschaften, in der Praxis stehende Ingenieure und Experten und eignet sich außerdem für die Weiterbildung im Themenfeld Elektrik/Elektronik in Kraftfahrzeugen. Es vermittelt die notwendigen Grundlagen der Elektrotechnik, erläutert elektronische Schaltungen und Bauelemente mit einem ausführlichen Teil über Halbleiterbauelemente, beleuchtet die verschiedenen Antriebskonzepte moderner Kraftfahrzeuge und die E/E-Architektur, um anschließend detailliert die Bestandteile des Bordnetzes zu erläutern und in die Komponenten, Funktionen und Konzepte des Energiebordnetzes einzutauchen. Ein Blick auf das physische Bordnetz vervollständigt die Thematik. Weitere wichtige Aspekte wie elektrisches Energiemanagement, Normen und Standards sowie Zuverlässigkeit, Funktionale Sicherheit und Diagnose von Energiebordnetzen werden dargestellt. Im Kapitel Systementwurf werden Tragweite und Bedeutung des Energiebordnetzes für zukünftige Systeme deutlich sichtbar.

Das Buch gliedert sich in einen allgemeinen Teil mit Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik und eine Einführung in die E/E-Architektur und das Bordnetz im Automobil sowie detaillierte Kapitel zum Datenbordnetz, Energiebordnetz und zum physischen Bordnetz. Daran anschließend werden die verschiedenen Verbraucher als Teilnehmer im Energiebordnetz beschrieben und die Grundlagen und Prinzipien des elektrischen Energiemanagements erläutert. Weitere Kapitel widmen sich den Normen und Standards im Themengebiet des Energiebordnetzes und den Fragestellungen zu Qualität und Zuverlässigkeit im Bordnetz. Im abschließenden Kapitel werden die Detailspekte aus den einzelnen Kapiteln zusammengefasst und ein gesamthafes Vorgehen für einen zukunftsfähigen Systementwurf für das Energiebordnetz aufgezeigt.

Ein allgemeines Literaturverzeichnis ist am Ende des Buches angefügt und verweist auf Fachbücher und Veröffentlichungen, die teilweise mehrere Kapitel betreffen. Darüber hinaus enthalten einige Kapitel zusätzliche spezifische Literaturhinweise.

Autoren

Dr.-Ing. Joachim Fröschl hat Elektrotechnik an der Technischen Universität München studiert und als Dipl.-Ing. Univ. 1989 abgeschlossen. Seit 1989 hat er unterschiedliche Aufgaben in den Bereichen Motorsteuerung, Datenvernetzung, Hybridantrieb und Vorentwicklung Energiebordnetz bei BMW verantwortet. In 2020 absolvierte er seine Promotion mit dem Thema „Kybernetisches Energiemanagement elektrischer Energiewandlung in Kraftfahrzeugen“ an der technischen Universität München.

Dipl.-Ing. Univ. Ottmar Sirch hat Elektrotechnik mit dem Schwerpunkt Halbleitertechnik an der Technischen Universität München studiert und 1985 abgeschlossen. Von 1985 bis 2001 war er bei der Siemens AG im Bereich Halbleiter – ab 1999 Infineon Technologies AG – in verschiedenen Aufgabengebieten tätig und wechselte 2001 zur BMW Group in die Entwicklung Elektrik/Elektronik. Dort hat er in der Serienentwicklung elektronischer Systeme für Heizung/Klima begonnen, anschließend die Vorentwicklung von Energiebordnetzen verantwortet, weitere Erfahrungen in der Kostenanalyse von Leistungselektronik gesammelt und ist augenblicklich für die Vorentwicklung von Fahrdynamiksystemen aus Energiebordnetz-sicht zuständig. An der Einführung von 48 V als Spannungsebene in der Automobilindustrie und der Erarbeitung des Quasi-Standards VDA-320 hatte er maßgeblichen Anteil.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die inspirierenden Gespräche und Hinweise bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog, TU München, Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, RWTH Aachen, Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz, Universität Kassel, und Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund.

Inhalt

1	Einleitung	13
1.1	Antriebsarten	13
1.1.1	Konventioneller Antrieb	16
1.1.2	Hybridantrieb	18
1.1.3	Elektrischer Antrieb	27
1.2	Elektrik/Elektronik im Automobil	30
1.2.1	Historie der Elektrik/Elektronik im Automobil	30
1.2.2	Das Bordnetz im Automobil	32
2	Grundlagen für Elektronik im Kraftfahrzeug	34
2.1	Grundlagen der Elektrotechnik allgemein	34
2.1.1	Elementare Elektrizitätslehre	34
2.1.2	Das ohmsche Gesetz	37
2.1.3	Das elektrische Feld	37
2.1.4	Das magnetische Feld	39
2.1.5	Impedanz	40
2.1.6	Energie und Leistung	41
2.1.7	Elektromagnetische Felder	41
2.1.8	Elektrische Maschinen	41
2.1.9	Weitere elektrische Maschinen	58
2.2	Entwurf elektrischer Schaltkreise	58
2.2.1	Schaltungstechnik elektrischer Netzwerke	59
2.2.2	Simulation von Schaltkreisen	62
2.3	Elektronische Baugruppen	62
2.3.1	Schaltungsträger	63
2.3.2	Passive Bauelemente	66
2.3.3	Halbleiterbauelemente	70
2.4	Gehäuse und Kontaktierung	108
2.5	Elektromagnetische Verträglichkeit	108
2.6	Weiterführende Literatur	108
3	E/E-Architektur	110
3.1	Definitionen	111
3.2	Architekturentwicklung	112

3.3	Grundlegende Architekturkonzepte	114
3.3.1	Funktional verteilte E/E-Architekturen	114
3.3.2	Domänenzentralisierte E/E-Architekturen	115
3.3.3	Fahrzeugzentralisierte E/E-Architekturen	116
3.4	Zukünftige Architekturen	117
3.5	E/E-Architekturbausteine	120
3.5.1	Leistungsfähige Zentralrechner und Steuergeräte	121
3.5.2	Fehlertolerante Kommunikationsnetzwerke	122
3.5.3	Fehlertolerante Energiebordnetze	122
3.5.4	Redundanzkonzepte für Sensoren	123
3.5.5	Redundanzkonzepte für Aktuatoren	123
3.6	Zusammenfassung E/E-Architektur	123
4	Das Bordnetz im Automobil	124
4.1	Das Bordnetz als Gesamtansatz	124
4.2	Die Kriterien eines Bordnetzes	125
4.3	Die Komplexität eines Bordnetzes	127
4.4	Ausblick für zukünftige Bordnetze	129
4.5	Zusammenfassung Bordnetz	130
5	Datenbordnetz	131
5.1	Begriffe und Definitionen	131
5.1.1	Daten, Information und Wissen	131
5.1.2	Signale und deren Codierung	132
5.1.3	Datenpakete und Übertragung großer Datenmengen	134
5.1.4	Übertragungsparameter in einem Fahrzeug-Datenbordnetz	136
5.2	Netzstrukturen und Netzwerke	139
5.3	Bussysteme im Kraftfahrzeug	141
5.3.1	CAN	142
5.3.2	LIN	147
5.3.3	FlexRay	148
5.3.4	MOST	149
5.3.5	Ethernet	150
5.4	Hinweise, Tools und Technik	150
5.5	Zusammenfassung	150
6	Energiebordnetz	152
6.1	Eigenschaften im Niedervolt-Energiebordnetz	154
6.1.1	Startfähigkeit	155
6.1.2	Ladebilanz	155
6.1.3	Speicherbelastung	156

6.1.4	Spannungsstabilität	156
6.1.5	Elektrischer Leistungsbedarf	157
6.1.6	Sichere Energieversorgung	158
6.1.7	Robustheit	159
6.2	Energieerzeugung	159
6.2.1	Generatoren	159
6.2.2	Starter-Generatoren	160
6.2.3	Elektromaschinen	161
6.3	Energiespeicherung	162
6.3.1	Bleibatterien	165
6.3.2	Lithium-Ionen-Batterien	166
6.3.3	Batterie-Sensoren für Bleibatterien	168
6.3.4	Batterie-Management für Lithium-Ionen-Batterien	169
6.4	Energiewandlung	169
6.4.1	Kategorisierung von DC/DC-Wandlern	170
6.4.2	Schaltungstopologien für DC/DC-Wandler	170
6.4.3	Galvanisch gekoppelte DC/DC-Wandler	171
6.4.4	Galvanisch getrennte DC/DC-Wandler	171
6.4.5	Regelung von DC/DC-Wandlern	172
6.4.6	Wirkungsgrad	172
6.4.7	Fehlertoleranz	172
6.5	Elektrische Verbraucher	174
6.6	Klemmen	175
6.7	Energiebordnetz-Architekturen	176
6.7.1	Ein-Spannungs-Bordnetz	180
6.7.2	Zwei-Spannungs-Bordnetz	180
6.8	Spannungsebenen	182
6.9	Neue Herausforderungen in einem Zwei-Spannungs-Bordnetz	185
6.9.1	Elektrisches Energie- und Leistungsmanagement	185
6.9.2	Lichtbögen	186
6.9.3	Kurzschlüsse zwischen den Spannungsebenen	188
6.9.4	Kommunikation in gemischten Netzwerken	188
6.9.5	Power-Up und Power-Down	189
6.9.6	Elektromagnetische Verträglichkeit	189
6.9.7	Umgang mit Spannungen < 60 V	189
6.9.8	Literaturhinweise	190
7	Physisches Bordnetz	191
7.1	Anforderungen	192
7.2	Kabelbaum	193
7.3	Leitungen	195

7.4	Steckverbindungen	197
7.5	Stromverteiler	200
7.6	Sicherungen	200
7.7	Auslegung von Leitungen und Sicherungen	203
7.8	Trends im Physischen Bordnetz	204
7.8.1	Elektronische Sicherungen	205
7.8.2	Intelligente Leistungsverteiler	207
7.8.3	Zonenkabelbäume	207
7.9	Literaturhinweise	207
8	Elektrische Verbraucher	209
8.1	Elektronische Steuergeräte	210
8.1.1	Grundlagen Elektronische Steuergeräte	211
8.1.2	Antriebselektronik	212
8.1.3	Fahrwerkselektronik	219
8.1.4	Komfort- und Karosserieelektronik	224
8.1.5	Insassenschutz-Elektronik	224
8.1.6	Informations- und Unterhaltungselektronik	226
8.1.7	Zentral-Rechenplattformen	227
8.2	Aktuatoren	228
8.2.1	Elektromotoren	228
8.2.2	Pumpen	228
8.2.3	Magnetventile	228
8.3	Sensoren	229
8.4	Zusammenfassung	230
9	Elektrisches Energiemanagement	231
9.1	Einleitende Grundlagen	231
9.2	Anforderungen und Aufgaben eines Energie- und Leistungs-Managements	232
9.3	Eigenschaften eines Energie- und Leistungs-Managements	233
9.4	Struktur des Managementsystems	237
9.5	Schnittstellen Komponente – Management	241
9.6	Betriebsstrategie mit einem Energie- und Leistungs-Management	243
9.7	Implementierungsprinzipien für ein Energie- und Leistungs-Management	248
9.8	Diagnose und Überwachung mit einem Energie- und Leistungs-Management	252
9.9	Systementwurf eines Energie- und Leistungs-Managements	253
9.10	Zusammenfassung	255
9.11	Weiterführende Literatur	255

10	Normen und Standards für das Bordnetz	257
10.1	Normen für 12 V	257
10.2	Norm für 48 V	260
10.3	Norm für Hochvolt-Systeme	261
10.4	Norm für Klemmenbezeichnungen	262
10.5	Normen für elektromagnetische Verträglichkeit	263
10.6	ISO 26262	264
11	Zuverlässigkeit und Funktionale Sicherheit im Energiebordnetz	265
11.1	Qualität und Zuverlässigkeit im Bordnetz	265
11.2	Funktionale Sicherheit im Bordnetz	267
12	Systementwurf Energiebordnetz	270
12.1	Architekturansatz	271
12.2	Architekturelemente der Energieversorgung im Fahrzeug	272
12.2.1	Intelligente Stromverteilung	272
12.2.2	Gleichspannungswandler als verteilte Wandler	275
12.2.3	Verwendung unterschiedlicher Spannungsebenen	276
12.2.4	Zonen	278
12.2.5	Energieversorgung für Fail-operational Systeme	279
12.2.6	Zukünftiges Energie- und Leistungs-Management	279
12.2.7	Integrationsplattformen	279
12.2.8	Intelligente Satelliten – Smarte Systeme	280
12.2.9	Zustands- und Infrastruktursignale mittels Powerline Kommunikation	280
12.2.10	Gesamthafte Bordnetzstabilität	281
12.2.11	Sichere Energieversorgung	282
12.3	Auslegung und Dimensionierung des Energiebordnetzes	284
12.4	Zusammenfassung	285
13	Effizienz im Energiebordnetz	287
13.1	Effizienzmaßnahmen in Steuergeräten und Lasten	289
13.2	Verlagerung von ausgewählten Verbrauchern auf 48 V	291
13.3	Effizienzberechnungen zum Vergleich zwischen 12 V und 48 V	292
13.3.1	Beispiel Lenkung	296
13.4	Kompletter Umstieg auf 48 V	301
13.4.1	Analytische Betrachtung	304
13.5	Zusammenfassung	306
	Literatur- und Quellenverzeichnis	307

Abkürzungsverzeichnis	314
Symbole und Konstanten in der Elektrotechnik	317
Register	319
Abbildungsverzeichnis	321
Tabellenverzeichnis	329

1 Einleitung

Ein Automobil setzt sich aus verschiedenen, größtenteils von Zulieferern gefertigten Teilen zusammen, die wiederum aus unterschiedlichen Materialien und Technologien bestehen und von einer Vielzahl unterschiedlicher Subzulieferer bereitgestellt werden. Diese Teile werden den klassischen Fahrzeugdomänen Antrieb, Fahrwerk, Karosserie, Exterieur und Interieur zugeordnet, die in der einen oder anderen Ausprägung auch die Organisationsstruktur des jeweiligen Automobilherstellers widerspiegeln. Als domänenübergreifende Querschnittsthemen sind vor allem Design, geometrische und funktionale Integration, Fahrzeugsicherheit, Akustik und Schwingungen, Energieeffizienz und Homologation sowie auch die Elektrik/Elektronik zu nennen. Die zuletzt genannte Elektrik/Elektronik ist in den letzten Jahrzehnten zu einer der wesentlichsten Säulen für Innovationen im Automobil geworden und hat durch die neuen Themen Elektromobilität, Digitalisierung und Automatisierung noch weiter an Bedeutung gewonnen.

Trotz dieser hohen Bedeutung und den damit verbundenen Entwicklungs- und Absicherungsaufwendungen für die Software und die notwendige Hardware stehen nach wie vor der Antrieb mit seinen verschiedenen Ausprägungen, das Design und die Fahrdynamik im Fokus der Kunden und des öffentlichen Interesses.

In diesem Fachbuch sollen nach einer kurzen Abhandlung der Antriebsarten und einem Blick auf die Historie der Elektrik/Elektronik im Automobil die notwendigen Grundlagen für Elektronik im Kraftfahrzeug vermittelt werden, um darauf aufbauend die E/E-Architektur im Allgemeinen zu erläutern, das Bordnetz im Kraftfahrzeug mit seinen verschiedenen Teildisziplinen zu behandeln und nach Betrachtung weiterer wichtiger Themen wie Energiemanagement, Normen und Standards sowie Qualität und Zuverlässigkeit auf den Systementwurf des Energiebordnetzes einzugehen.

1.1 Antriebsarten

Die Wahl der Antriebsart begleitet das Automobil seit den ersten Versuchen vor rund 200 Jahren, als erste Fahrzeugversuche ohne Nutzung von Zugtieren und unabhängig von Schienenwegen auftauchten. Es entwickelte sich sehr schnell ein Wettstreit zwischen Dampfmaschine, Elektromotor und Verbrennungskraftmaschine, in dem sich der Elektromotor aufgrund seiner technischen Vorzüge in einer aussichtsreichen Position befand.

Der französische Artillerieoffizier Nicolas Joseph Cugnot aus Lothringen konstruierte bereits 1769 einen Dampfwagen. Nicht Personen zu transportieren war sein Auftrag, sondern Kanonen sollten ohne menschliche Mühen an die Front gelangen. So war der Dampfwagen von Cugnot zwar kein Personenkraftwagen, aber dennoch

ein Kraftfahrzeug. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts machte der englische Erfinder Richard Trevithick von sich reden. Trevithick baute 1803 ein Dampfautomobil, den „puffenden Teufel“, wie ihn seine Passagiere nannten. Um 1830 wurde in London sogar eine Dampfbus-Linie eingerichtet. Womit der Beweis erbracht war, dass Dampfautos wirklich fahren.

Im Paris des Jahres 1881 fand sich auf der Elektrizitätsmesse „Exposition Internationale d'Électricité“ auch Gustave Trouvé ein. Der findige Ingenieur, der auch einen Vorläufer des Metalldetektors entwickelte oder Batterien für elektrischen Strom, zeigte dort etwas, das die Welt damals noch nicht gesehen hatte: Ein Dreirad mit Elektromotor und Batterie (siehe Bild 1.1), das sogar immerhin bis zu gut zehn km/h schnell war – eine Geschwindigkeit, die damals noch als gefährlich galt.



Bild 1.1: Elektrofahrzeug von Gustave Trouvé

Dampfkraft und elektrischer Strom waren die Energieformen, die Automobile damals ins Rollen brachten. Um die Jahrhundertwende stellten Verbrennungsmotoren zum Beispiel in den USA nur einen Anteil von einem Fünftel an allen auf den Straßen befindlichen Fahrzeugen dar.

Als Entstehungstag des Motorkraftwagens gilt allgemein der 29. Januar 1886. Da erhielt Carl Benz für sein erstes Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (siehe Bild 1.2) das Patent, weil er das Prinzip des zehn Jahre zuvor patentierten Ottomotors auf ein Straßenfahrzeug angewendet hatte.

Zu Zeiten von Carl Benz und Gottlieb Daimler waren noch alle drei Antriebsarten auf den Straßen zu sehen. Alle drei Antriebsarten waren sehr teuer, wenig verbreitet und noch mit großen Mängeln behaftet, die die Gebrauchstüchtigkeit erheblich einschränkten.

Oberbaurat a. D. Klose, Präsident des Mitteleuropäischen Motorwagen-Vereins, postulierte am 30. September 1897: „Als Motorfahrzeuge, welche ihre Energie zur Fortbewegung mit sich führen, machen sich zurzeit drei Gattungen bemerkenswert, nämlich: durch Dampf bewegte Fahrzeuge, durch Ölmotoren bewegte Fahrzeuge und durch Elektrizität bewegte Fahrzeuge. Die erste Gattung dürfte voraussichtlich in Zukunft hauptsächlich für Wagen auf Schienen und schwere Straßen-Fahrzeuge in Betracht kommen, während das große Gebiet des weiten Landes von Ölmotorfahrzeugen durchheilt werden und die glatte Asphaltfläche der großen Städte wie auch die Straßenschiene von mit Sammlerelektrizität getriebenen Wagen belebt sein wird.“



Bild 1.2: Motorwagen von Carl Benz [Quelle: Daimler-Benz-Museum]

Bei der Dampfmaschine waren die Nachteile vor allem das große Gewicht und die langwierige Startprozedur [1]. Das batteriebetriebene Elektrofahrzeug hatte die schwere Batterie als wesentlichen Nachteil und beim Verbrennungsmotor gab der viel Kraft erfordernde und nicht ganz ungefährliche Startvorgang mit der Starterkurbel den Ausschlag. Außerdem mangelte es an geeigneten Anfahrkupplungen und Schaltgetrieben. Der Verbrennungsmotor war in seiner Drehmoment- und Leistungscharakteristik dem Elektromotor weit unterlegen. Ferdinand Porsche baute um 1900 leistungsstarke, elektrisch angetriebene Rennfahrzeuge mit Radnabenmotoren. Diese Fahrzeuge waren im Rennen erfolgreich, benötigten aber 1800 kg schwere Batterien. Eine Kombination von Verbrennungsmotor und Elektromotor sollte die schwerwiegenden Nachteile beider Antriebe, schwere Batterie und problematische Anfahrkupplung, vermeiden. 1902 baute Porsche mit dem Wiener Fahrzeugbauer Lohner einen Hybridantrieb, den er „Mixte“ (siehe Bild 1.3) nannte. Der „Mixte“ steht damit im Zeichen des damaligen Wettbewerbs zwischen den batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben.



Bild 1.3: Lohner-Porsche von 1900

Dank der Entwicklung leistungsstarker Verbrennungsmotoren, gebrauchstüchtiger Anfahrkupplungen und leistungsfähiger Getriebe nahm die Akzeptanz des Verbrennungsmotors deutlich zu [1]. Als dann noch der elektrische Anlasser, basierend auf dem US-Patent von Clyde J. Coleman aus dem Jahr 1901, eingeführt wurde, wurde der Verbrennungsmotor im Automobil zum Standard. Der Antrieb von Fahrzeugen mit Dampfmaschinen konzentrierte sich auf die Schiene, und weitere Entwicklungen zu Elektro- oder Hybridantrieben fanden vorerst nicht statt.

Nach dem Aufstieg der Verbrennungsmotoren, befeuert vor allem auch durch das am Fließband massenhaft produzierte Model T von Henry Ford, fristete die Elektromobilität im Bereich der Personenkraftwagen über eine sehr lange Zeitspanne ein Nischendasein.

1.1.1 Konventioneller Antrieb

Der Verbrennungsmotor als Antrieb gilt bis heute als Basis des Automobils und steht nun in seiner mehr als hundertjährigen Geschichte vor einer der größten Herausforderungen. Neue Emissionsgesetzgebungen, wie z. B. in Europa mit Euro 6d, und Immissionslimitierungen in Großstädten bis hin zu möglichen Einfahrbeschränkungen in Innenstädten sowie zu erwartende erhebliche Preissteigerungen bei Kraftstoffen werden das Kaufverhalten der Fahrzeugkunden beeinflussen und damit die Zukunft des Verbrennungsmotors in Frage stellen [2]. Für die Erfüllung zukünftiger CO₂-Flottenzielwerte und Schadstoffgrenzwerte müssen alle technischen Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion des Verbrennungsmotors ausgeschöpft werden, um trotz der

voranschreitenden Marktdurchdringung mit Elektro- und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen diese Ziele tatsächlich zu erreichen, da zwischen den geforderten Reduzierungen der CO₂-Flottenmittelwerte und deren tatsächlichen Entwicklung eine nicht zu vernachlässigende Diskrepanz zu erkennen ist. In Verbindung mit den verschärften Vorgaben für die Emissionen im realen Fahrbetrieb (RDE = Real Driving Emissions) erfordert dies eine nachhaltige Verbesserung oder sogar eine Neuentwicklung von verbrennungsmotorbasierten Antriebssystemen.

Benzin- und Dieselmotoren mit verschiedenen Zylinderzahlen und unterschiedlicher regelungstechnischer Ausstattung über einer großen Leistungsbandbreite decken heute alle Fahrzeugsegmente und Kundenwünsche ab. Mit den steigenden Anforderungen nach Verbrauchs- und Emissionsreduzierung und den Kundenwünschen nach immer höherer Dynamik bei gleichzeitig steigenden Fahrzeuggewichten wurden die Regelung des Verbrennungsprozesses, die Aufladung und weitere Parameter aber auch die Reinigung der Abgase mit z. B. Katalysatoren, Abgasrückführung und Nachverbrennung stetig verbessert.

Bei Fahrzeugen, die Euro-6d-Temp erfüllen, treten signifikante Schadstoffemissionen nur noch im nicht betriebswarmen beziehungsweise hochdynamischen Motorbetrieb auf [2]. Die NO_x-Emissionen solcher Fahrzeuge mit aufgeladenen DI-Ottomotoren im betriebswarmen Motorbetrieb ergeben in einer Immissionsmodellrechnung eine so geringe Immissionsbelastung, dass diese sowohl hinsichtlich des automobilen Immissionsgrenzwerts (40 µg/m³) als auch des nicht-automobilen Immissionsniveaus (ca. 18µg/m³) praktisch vernachlässigbar wäre. Damit liegt die Herausforderung für eine weitere Emissionsreduzierung von Otto- und Dieselmotoren in der Verringerung der Schadstoffemissionen beim Start und im nicht betriebswarmen Betriebsbereich sowie im Temperaturmanagement der Abgasnachbehandlung und darüber hinaus im oberen Lastbereich, d. h. im hochdynamischen Motorbetrieb.

Derzeit gängige technologische Maßnahmen beim Ottomotor sind turboaufgeladene Benzin-Direkteinspritzung (DI), Einsatz des Miller/Atkinson-Zyklus, Dreiwegekatalysator und Ottomotor-Partikelfilter. Zusätzlich werden variable Verdichtung, funkengezündete homogene Kompressionszündung, verbesserte Zündsysteme und Hochdruckeinspritzung als weitere technologische Maßnahmen in Erwägung gezogen [2]. In Bild 1.4 ist eine Technologie-Roadmap für Ottomotoren dargestellt.

Trotz einer Vielzahl von Maßnahmen und Bemühungen reicht eine Weiterentwicklung konventioneller Antriebstechnologie alleine nicht aus, vor allem durch die gesetzlichen Vorgaben für die CO₂-Flottenemissionen [3]. Ab 2020 gilt in Europa ein CO₂-Grenzwert von durchschnittlich 95 g CO₂/km, der bis 2025 um weitere 15 % und bis 2030 um 37,5 % gesenkt werden muss. Einen Lösungsweg bieten hier z. B. lt. Volkswagen batterieelektrische Antriebe, bei denen das Unternehmen mit einem Absatzanteil von 25 % in 2025 rechnet. Daraus folgert Volkswagen jedoch im Kehrschluss, dass der überwiegende Anteil der Neufahrzeuge weiterhin mit Verbrennungsmotoren bestückt sein wird, woraus sich die Notwendigkeit eines Technologiemicx ableitet. Die Teilelektrifizierung in Form von Hybridantrieben in verschiedenen Ausprägungen

spielt dabei eine wesentliche Rolle und bündelt je nach Systemausprägung die Vorteile hinsichtlich Reichweite, Versorgungsinfrastruktur, Kosten, Verbrauch, Funktion und CO₂-Ausstoß. Niedervoltkonzepte wie 12 V-Micro-Hybrid und 48 V-Mild-Hybrid verfügen zwar über einen eingeschränkten Funktionsumfang, weisen aber ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aus.

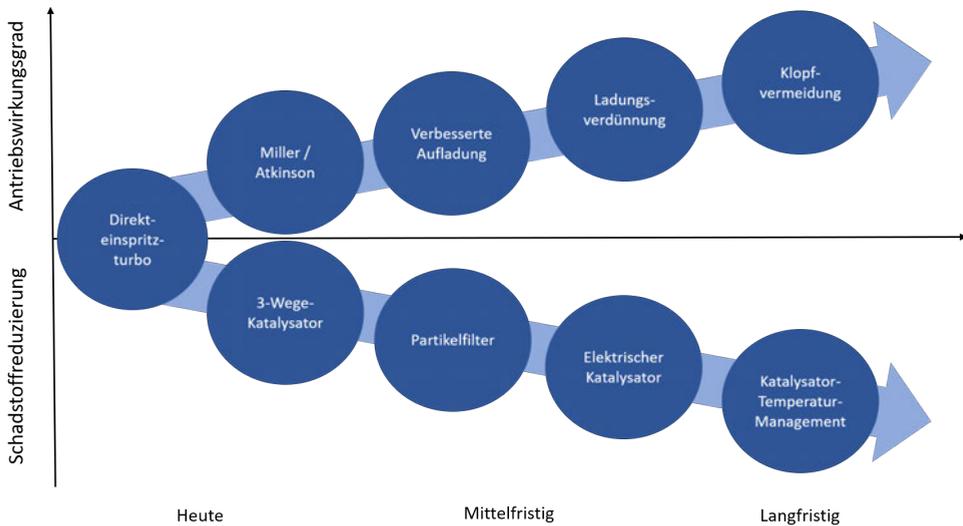


Bild 1.4: Technologie-Roadmap Ottomotor (schematisch) [2]

1.1.2 Hybridantrieb

Ein Hybridantrieb ist grundsätzlich eine Kombination aus zwei unterschiedlichen Antriebsarten. In der Automobilindustrie wird vor allem die Kombination eines verbrennungsmotorischen und eines elektromotorischen Antriebs als Hybridantrieb bezeichnet, wobei die Kopplung der beiden Antriebe sehr unterschiedlich gestaltet und in verschiedenen Leistungsklassen ausgeführt sein kann. Durch die Kombination der beiden Antriebsarten sollen die jeweiligen Nachteile des einen Antriebs durch die Vorzüge des anderen kompensiert werden und zu einem besseren Gesamtantrieb hinsichtlich Emissionen, Verbrauch und Reichweite führen.

Für die Kopplung des verbrennungsmotorischen und des elektromotorischen Antriebs werden unterschiedliche Konzepte gemäß Tabelle 1.1 genutzt.

Art	Beschreibung
Serieller Hybrid	Elektrische Kopplung: Verbrennungsmotor treibt Generator an und speist eine Batterie, aus der der Elektromotor für den Antrieb versorgt wird.
Parallelhybrid	Interne mechanische Kopplung im Antriebsstrang: Verbrennungsmotor und Elektromotor(en) wirken parallel auf den Antriebsstrang.
Straßengekoppelter Hybrid	Externe mechanische Kopplung über die Fahrbahn: Verbrennungsmotor und Elektromotor(en) wirken auf unterschiedliche Achsen/Räder.

Tabelle 1.1: Konzepte des Hybridantriebs

Zusätzlich werden nach den Integrationsorten der Elektromotoren Klassifikationen der Hybridantriebe unterschieden, wie in Bild 1.5 dargestellt.

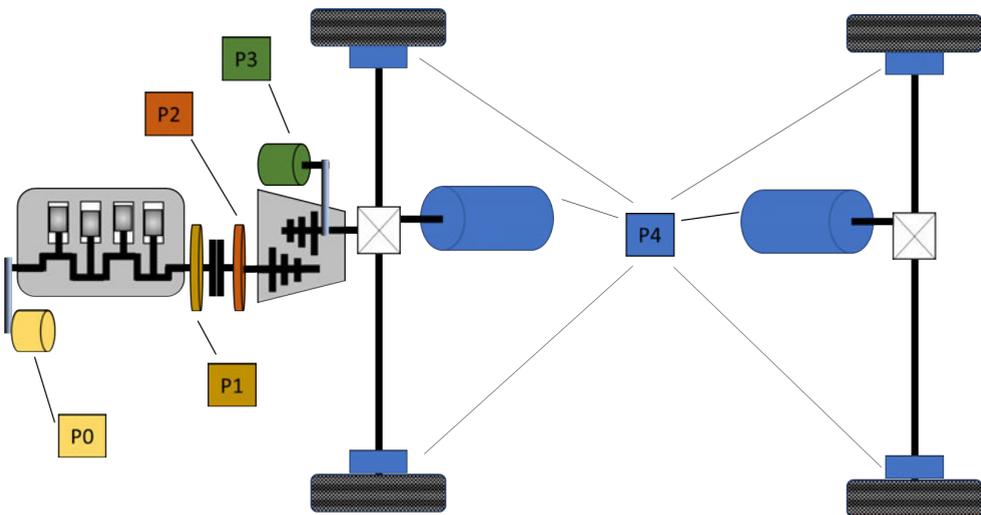


Bild 1.5: Schematische Darstellung der Integrationsorte einer Elektromaschine für Hybridantriebe [4]

In Tabelle 1.2 ist die Klassifikation der Hybridantriebe in Ergänzung zu Bild 1.5 textuell beschrieben.

Klassifikation	Integrationsort
P0	Riemenebene
P1	am Kurbelwellenausgang des Verbrennungsmotors
P2	am Eingang zum Getriebe mit zusätzlicher Kupplung
P3	achsparell zum Getriebe
P4	an der Antriebswelle, an der Achse oder an den Rädern

Tabelle 1.2: Klassifikation der Hybridantriebe

Folgende Ausprägungen von Hybridantrieben werden typischerweise in der Fahrzeugtechnik gemäß Tabelle 1.3 unterschieden, wobei sich nicht jede Art der Kopplung in den einzelnen Ausprägungen umsetzen lässt.

Ausprägung	Klassifikation	Spannungslage
Micro-Hybrid	P0	12 V
Mild-Hybrid	P0, P1, P2	48 V
Full-Hybrid	P2, P3, P4	Hochvolt
Plug-In Hybrid	P2, P3, P4	Hochvolt

Tabelle 1.3: Typische Ausprägungen des Hybridantriebs

In Bild 1.6 ist ein schematischer Vergleich der CO₂-Einsparpotenziale der verschiedenen Elektrifizierungskonzepte in Abhängigkeit der jeweils typischen Systemspannungslage dargestellt. Es werden darin die unterschiedlichen Hybridisierungskonzepte und Elektrofahrzeuge zueinander geordnet. Nachfolgend werden die Hybridisierungskonzepte näher erläutert.

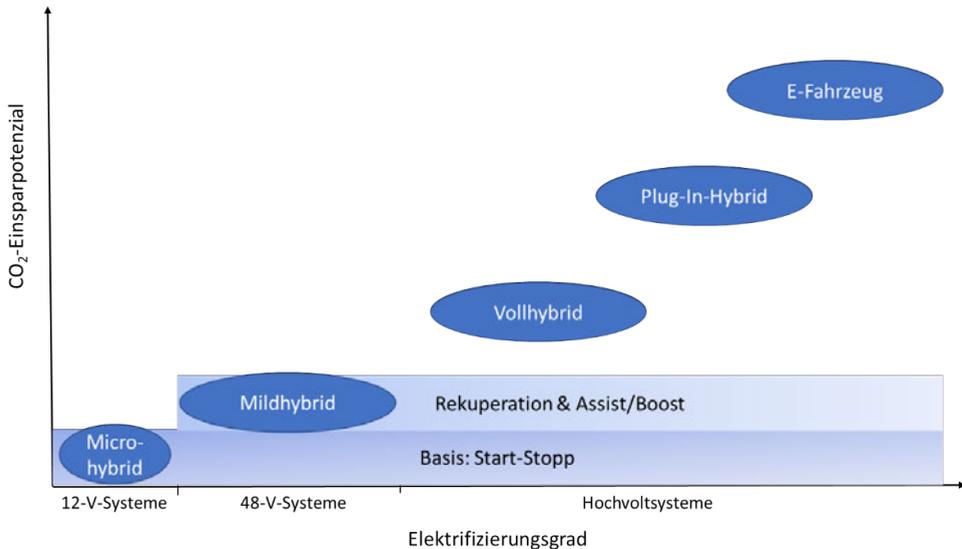


Bild 1.6: Vergleich der CO₂-Einsparpotenziale verschiedener Antriebskonzepte (schematisch) nach [3]

1.1.2.1 Micro-Hybrid

Mikro-Hybride nutzen im bestehenden 12 V-Bordnetz entweder verbesserte Kurbelwellenstarter und den vorhandenen Generator oder an Stelle des Generators eingesetzte Starter-Generatoren, um den Verbrennungsmotor während den Standphasen des Fahrzeugs abzulegen und bei Wiederaufnahme der Fahrt erneut zu starten. Diese Funktion wird häufig als Motor-Stopp-Start bezeichnet. Diese Form eines Hybridantriebs kann zusätzlich den Verbrennungsmotor im Schubbetrieb oder Leerlauf ablegen und bei Bedarf sofort wieder starten. Wenn der Fahrer den Fuß vom Gas nimmt, kann das Fahrzeug zusätzlich zum Motorschleppmoment durch die Generatorfunktion verzögert werden, indem ein Teil der Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt wird, um damit die Bordnetzbatteie aufzuladen. Branchenschätzungen zufolge kann dieser Ansatz die CO₂-Emissionen um bis zu 4 % reduzieren. Fahrzeuge mit Motor-Stopp-Start sind heute am Markt etabliert und weit verbreitet.

1.1.2.2 Mild-Hybrid

Der Ansatz des Mild-Hybrid geht einen Schritt weiter und verwendet eigens entwickelte Elektromotoren auf einem höheren Spannungsniveau als 12 V, um höhere elektrische Leistungen sowohl motorisch als auch generatorisch darstellen zu können. Mit dieser höheren elektrischen Leistung kann der Verbrennungsmotor signifikant unterstützt werden und in effizientere Betriebspunkte im Motorkennfeld verschoben

werden, um Verbrauch und CO₂-Emissionen zu senken. Zusätzlich kann der Elektromotor in Beschleunigungsphasen des Fahrzeugs zusätzliches Drehmoment erzeugen, so dass trotz Downsizing des Verbrennungsmotors das Fahrzeug auf vergleichbare oder sogar bessere Fahrleistungen kommt. Vor allem aber macht sich die höhere elektrische Leistung bei der Rekuperation von elektrischer Energie bemerkbar. In einer zeitlich begrenzten Verzögerungsphase, deren Dauer als unverändert anzunehmen ist, kann erheblich mehr elektrische Energie in einem geeigneten elektrischen Speicher aufgenommen werden als in einem 12 V-Bordnetz. Diese Energie kann dann wieder während einer anschließenden Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit oder in einer Beschleunigungsphase des Fahrzeugs zur Versorgung des Bordnetzes und seiner Verbraucher genutzt werden. Dies geschieht dann ohne Belastung des Verbrennungsmotors und somit ohne Verbrauchsanteil von Kraftstoff für die Versorgung der elektrischen Systeme.

Erste konkrete Anwendungen von Mild-Hybrid-Fahrzeugen wurden mit Systemspannungen im Bereich von 100 V bis 120 V realisiert. Ein Elektromotor mit bis zu 25 kW Leistung, ein leistungsfähiger elektrischer Energiespeicher basierend auf Lithium-Ionen-Zellen und ein galvanisch isolierter DC/DC-Wandler bildeten das zusätzliche System dafür. Da für Gleichspannungen größer 60 V bereits alle geforderten Sicherheits- und Schutzfunktionen für Hochvoltsysteme in Kraftfahrzeugen anzuwenden sind, erwies sich dieser Ansatz als technisch tragfähig, aber aus Kostensicht als nicht zielführend. Sowohl Mercedes-Benz in der S-Klasse als auch der BMW 7er (siehe Bild 1.7) waren eine der wenigen in Serie gebrachten Fahrzeugmodelle mit Mild-Hybrid-Antrieb, wobei die erreichten Stückzahlen nicht sehr hoch waren.

Das Prinzip des Mild-Hybrid-Antriebs fand neuen Schwung mit der Initiative für 48 V und der gleichzeitig in Europa durchgeführten Veränderung der Rahmenbedingungen für die Bewertung des CO₂-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen. Der Normverbrauchszyklus wurde für Fahrzeuge ab dem Modelljahr 2018 vom Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEDC) auf den Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP) umgestellt. Der Vergleich der unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile von NEDC und WLTP sind in Tabelle 1.4 bzw. Bild 1.8 dargestellt.

Während der NEDC über einen hohen Anteil an Stopp-Phasen verfügt, ist der von der Europäischen Union ab 2018 geforderte WLTP durch erheblich weniger Stopp-Phasen gekennzeichnet. Die Wegstrecke des WLTP ist mehr als doppelt so lang wie beim NEDC, die Dauer nimmt um ca. 50 % zu. Der Anteil der Verzögerungsphasen erhöht sich deutlich, wobei die maximale Verzögerung nur geringfügig höher ist. Beim WLTP im Gegensatz zum NEDC werden Sonderausstattungen, jedoch keine Einschaltprofile von Komfortfunktionen berücksichtigt. Eine deutliche Erhöhung der Verzögerungsanteile von 31 % auf 43 % begünstigt die Gewinnung von elektrischer Energie durch Rekuperation.

	NEDC	WLTP
Wegstrecke [km]	11,013	23,141
Dauer [s]	1180	1800
Mittl. Geschwindigkeit [km/h]	33,6	46,3
Max. Geschwindigkeit [km/h]	120	131
Max. Beschleunigung [m/s^2]	1,04	1,88
Max. Verzögerung [m/s^2]	-1,39	-1,52
Standzeiten [s]	280	227
Anteil Standzeiten [%]	23,7	12,6
Anteil Verzögerung [%]	31,0	43,1

Tabelle 1.4: Tabellarischer Vergleich zwischen NEDC und WLTP

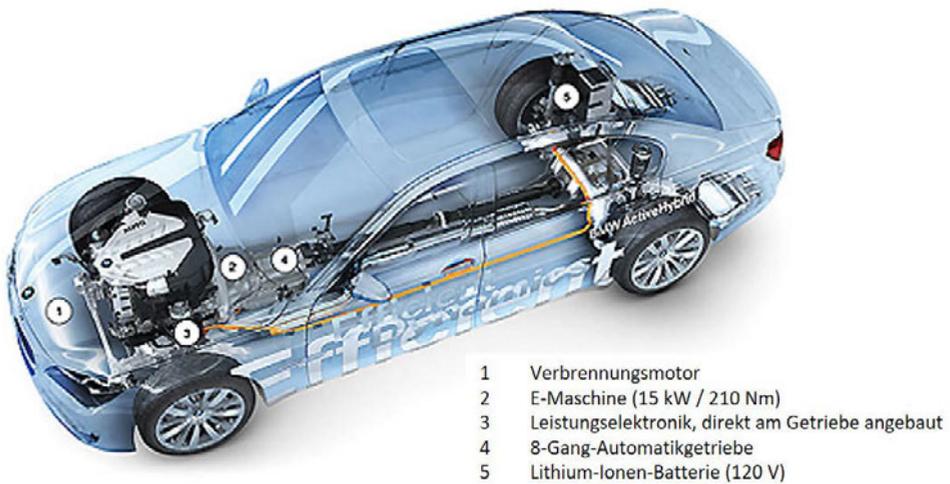


Bild 1.7: BMW 7er active Hybrid – „Röntgenbild“ [Quelle: BMW Group]

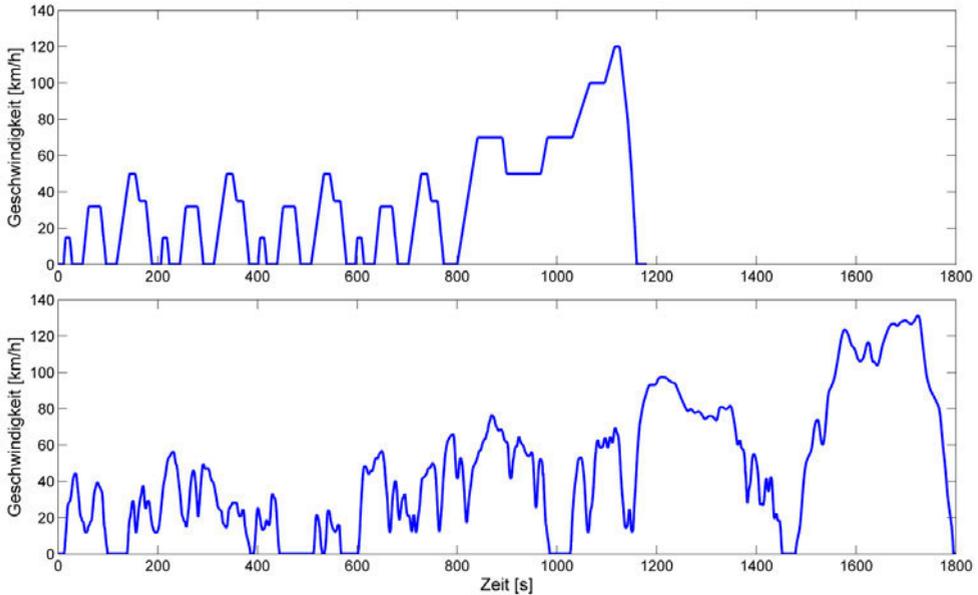


Bild 1.8: Geschwindigkeitsprofile NEDC (oben) im Vergleich zu WLTP (unten)

Dank der vorbereitenden Arbeiten zur VDA-320 als Empfehlung für die Spezifikation des Spannungsbereichs von 48 V im Automobil und den dort ebenfalls spezifizierten elektrischen Tests für 48 V-Komponenten konnte das Basissystem für Mild-Hybride ab 2014 schnell in die Entwicklung gebracht werden, so dass 2017 die ersten Serienfahrzeuge mit einem solchen System auf den Markt kamen. In den Folgejahren wurden weltweit von nahezu allen Automobilherstellern Mild-Hybrid-Fahrzeuge basierend auf 48 V auf den Markt gebracht, die schnell signifikante Stückzahlen erreichten und sich von Modellen der Kompaktklasse bis zur Oberklasse erstreckten.

Das Basissystem besteht aus einem 48 V-Starter-Generator im Riementrieb (P0) oder einem 48 V-Elektromotor am Kurbelwellenausgang (P1), einer 48 V-Lithium-Ionen-Batterie und einem einfacheren DC/DC-Wandler, deren Kosten im Vergleich zu Systemen mit 100 V bis 120 V deutlich geringer liegen, da bei Gleichspannungen kleiner 60 V die Sicherheits- und Schutzfunktionen für Hochvoltssysteme in Kraftfahrzeugen entfallen.

Als Beispiel einer Realisierung ist in Bild 1.9 das 48 V Mild-Hybrid-System des Golf 8 von Volkswagen dargestellt [3]. Der 48 V-Starter-Generator im Riementrieb (englisch: 48 V belt-driven starter alternator) kann im generatorischen Betrieb bis zu 12 kW elektrische Leistung erzeugen und im motorischen Betrieb mit bis zu 9 kW ein Drehmoment von 200 Nm auf die Kurbelwelle bringen. Hierfür wurde ein neuartiges mechanisches Spannsystem für den Riementrieb entwickelt. Die 48 V-Lithium-Ionen-Batterie hat einen Energieinhalt von ca. 250 Wh und ist unter dem Beifahrersitz verortet. Der DC/DC-Wandler koppelt die

Spannungsebenen von 48 V und 12 V im Bordnetz und kann stationär 2,7 kW und für kurze Zeitabschnitte 3,7 kW von der 48 V-Ebene in das 12 V-Bordnetz wandeln.

Für einen solchen 48 V-Mild-Hybrid-Ansatz mit z. B. einem 10 kW-Elektromotor im Riementrieb (P0) und einem elektrisch beheizten Katalysator (E-Kat) mit 4 kW Heizleistung ergibt sich ein Verbrauchspotential in der Größenordnung von 6 % und einer zusätzlichen Reduktion der NO_x-Emissionen [2]. Mit den Integrationsstufen P1 (motorausgangsseitige Integration des Elektromotors direkt auf der Kurbelwelle) und P2 (getriebeeingangsseitige Integration des Elektromotors mit einer zusätzlichen Kupplung) können in der höchsten Ausbaustufe sogar bis zu 15 % Verbrauchspotential erreicht werden.

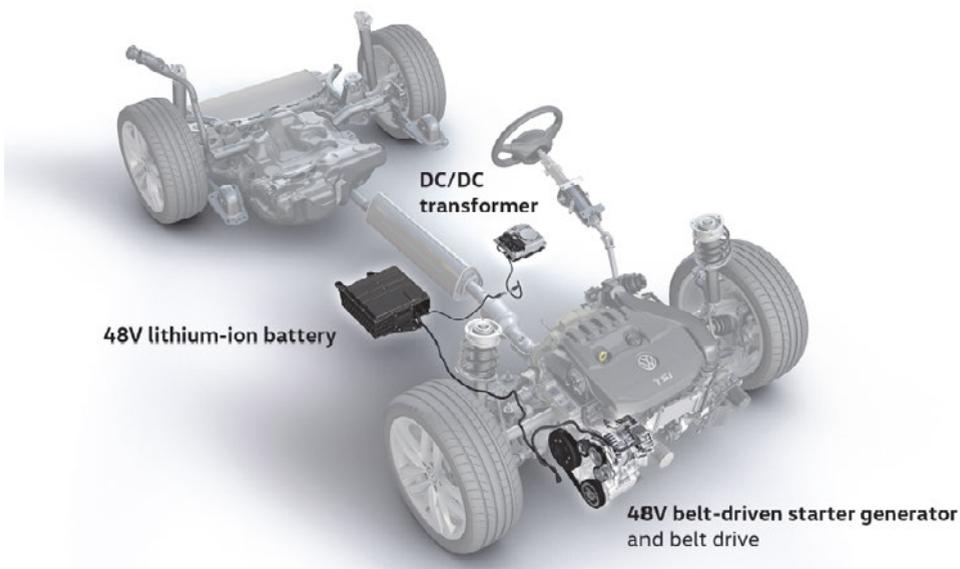


Bild 1.9: 48 V Mild-Hybrid-Antriebssystem des Volkswagen Golf 8. Generation [3]

1.1.2.3 Full-Hybrid

In einem Full-Hybrid wirken Elektro- und Verbrennungsmotor gemeinsam auf den Antriebsstrang. Das Getriebe übernimmt dabei häufig die mechanische Kopplung der Motoren. Im Gegensatz zu Micro- und Mild-Hybrid-Fahrzeugen ist auch ein kurzes rein elektrisches Fahren möglich, da in diesen Systemen Elektromotoren in der Leistungsklasse von 20 kW bis 40 kW oder mehr eingesetzt werden. Die elektrische Reichweite ist primär vom Energieinhalt und damit von der Größe der Hochvolt-Batterie abhängig. Damit können Verbrauch und Emissionen um bis zu 30 % reduziert werden.

Zum Hybrid-System gehören neben dem Elektromotor eine Hochvoltbatterie zur Versorgung der Elektromotoren und zum Speichern der erzeugten elektrischen Ener-

gie, eine Leistungselektronik (Wechselrichter) als Bindeglied zwischen Batterie und Elektromotor, ein Gleichspannungs- oder DC/DC-Wandler zur Versorgung des Nieder-volt-Bordnetzes aus dem Hochvolt-Bordnetz, ein regeneratives Bremssystem und eine Antriebssteuerung für das Zusammenwirken von Elektro- und Verbrennungsmotor. In einigen Anwendungen werden auch zwei Elektromotoren eingesetzt.

Full-Hybrid-Fahrzeuge gab es sehr früh im Markt. Als erstes Full-Hybrid-Fahrzeug gilt der Toyota Prius mit seiner Markteinführung 1997. Er verfügte in der ersten Generation über einen 1,5-Liter-Benzinmotor mit 58 PS sowie über einen Elektromotor, der 40 PS leistete. Spätere Modellgenerationen waren mit 2 Elektromotoren ausgestattet, und an Stelle der Nickel-Metallhydrid-Batterie aus der ersten Generation kam eine Lithium-Ionen-Batterie ebenfalls auf 288 V zum Einsatz. Details des neueren Hybridsystems sind in Bild 1.10 dargestellt. In der aktuellen Version wird der Toyota Prius inzwischen als Plug-In-Hybrid mit 2,0-Liter-Benzinmotor und nur 1 Elektromotor angeboten [5].

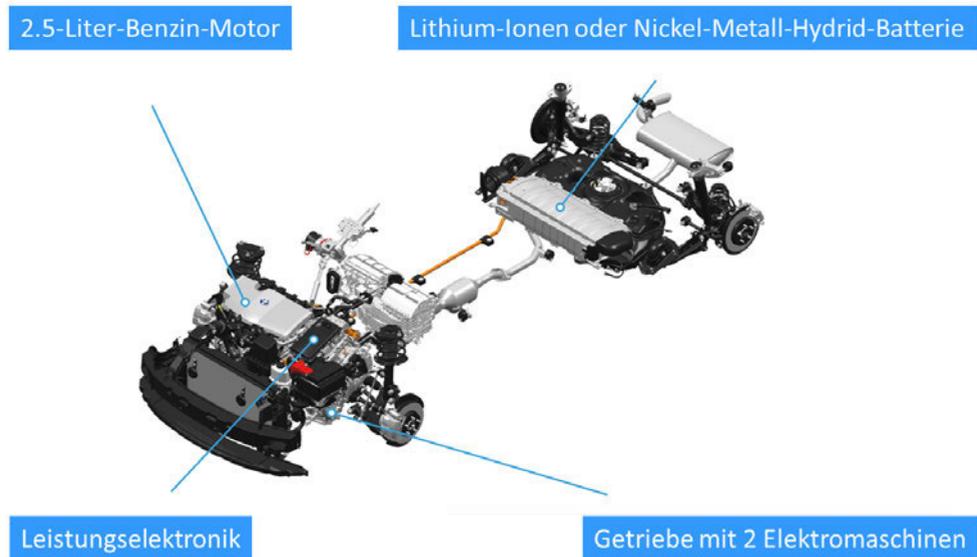


Bild 1.10: Hybridsystem Toyota Prius, nach [5]

1.1.2.4 Plug-In-Hybrid

Beim Plug-In-Hybrid kann im Vergleich zum Vollhybrid die Hochvolt-Batterie wie beim Elektrofahrzeug von extern geladen werden. Entsprechend leistungsstarke Komponenten ermöglichen höhere Geschwindigkeiten und größere Reichweiten im elektrischen Fahrbetrieb. Die Hochenergiezellen der Batterie ermöglichen die Speicherung und Entnahme auch größerer Energiemengen für längere Fahrstrecken. Der Elektro-

motor übernimmt im motorischen Betrieb den elektrischen Antrieb des Fahrzeugs. In seiner Generatorfunktion arbeitet er mit dem regenerativen Bremssystem zusammen, um einen Teil der Bremsenergie in Elektrizität umzuwandeln, siehe Bild 1.11.

Ein Plug-In-Hybrid, der zum Laden seiner Akkus die externe Ladestation nutzt, kann die Emissionen um bis zu 75 % senken und ist in der Lage, eine gewisse Strecke rein elektrisch zu fahren, so dass mit diesem Fahrzeug ein nur für elektrisches Fahren zugelassenes Areal befahren werden kann. Die Anfahrt bis zu diesem Areal kann verbrennungsmotorisch erfolgen und somit auch eine größere Distanz sein.

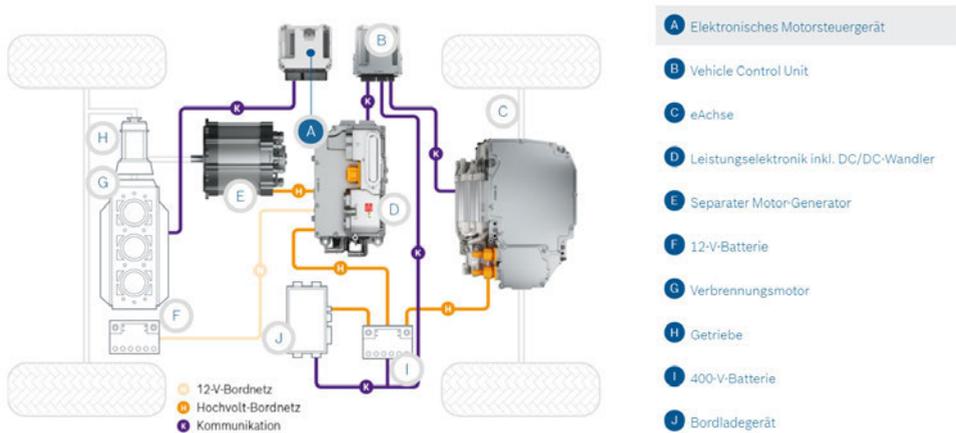


Bild 1.11: Systemübersicht Plug-In-Hybrid, nach [6]

1.1.3 Elektrischer Antrieb

Der rein elektrische Antrieb stellt die höchste Stufe der Elektrifizierung dar. In batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) gibt es nur ein elektrisches Antriebsystem, bestehend aus Leistungselektronik, Elektromotor, Getriebe und Batterie sowie einer Ladeeinheit, siehe Bild 1.12. Es ist in diesen Fahrzeugen kein Verbrennungsmotor vorhanden, der bei entladener Batterie das Fahrzeug antreiben könnte. Nur der Elektromotor kann das Fahrzeug antreiben.

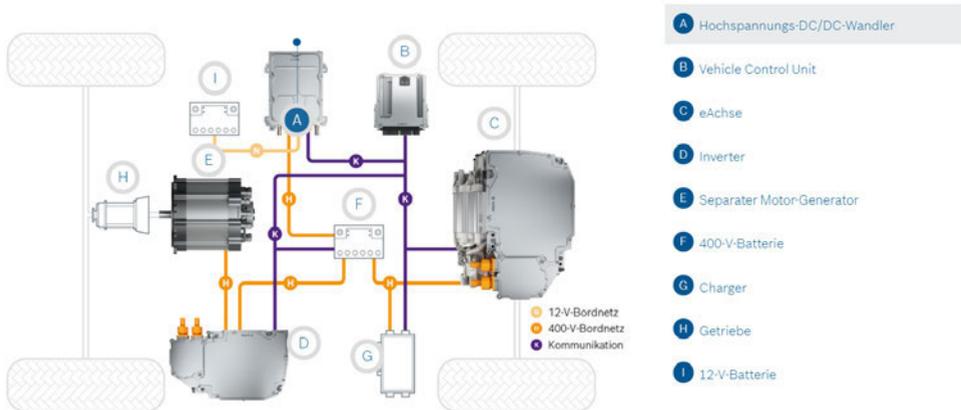


Bild 1.12: Systemübersicht Elektroantrieb [6]

Die Versorgung des Elektromotors mit Strom erfolgt aus der Batterie, die von extern über die Ladeeinheit während der Abstellphase des Fahrzeugs geladen wird. Die Hochenergiezellen der Batterie gewährleisten, dass große Mengen an elektrischer Energie für längere Strecken gespeichert werden können. Elektrofahrzeuge erreichen bereits Reichweiten von über 500 km. Steigende Wirkungsgrade des Antriebssystems und verbesserte Batterietechnologien lassen die Reichweite für Elektrofahrzeuge auch in Zukunft weiter ansteigen.

Das elektrische Antriebssystem erzeugt lokal keine CO_2 -Emissionen. Der Strommix des jeweiligen Landes bzw. des Stromanbieters ist für die CO_2 -Emissionen entscheidend. Ebenso ist in brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen, denen langfristig eine wichtige Rolle für emissionsfreies Fahren zufällt, nur ein elektrisches Antriebssystem vorhanden. Aufgrund der in Form von Wasserstoff mitgeführten Energie kann die Batterie kleiner dimensioniert werden, da mittels der Brennstoffzelle elektrische Energie während der Fahrt erzeugt und damit die Batterie nachgeladen werden kann.

Für die Architektur der elektrischen Antriebssysteme bieten sich verschiedene Konzepte an. Am Häufigsten wird ein einzelner Elektromotor so angeordnet, dass er auf eine Antriebsachse wirkt. Werden 2 Elektromotoren integriert, dann wird je Antriebsachse ein Elektromotor verwendet, so dass ein Allradantrieb realisiert werden kann. Das Bild 1.13 zeigt dagegen die Integration von 2 Elektromotoren auf einer Achse, womit die beiden Räder an dieser Achse individuell gedreht werden können, d. h. mit voneinander unabhängigen Drehzahlen und Drehmomenten. Alternativ kann auch ein Elektromotor pro Rad, siehe Bild 1.14, eingesetzt werden, entweder auf einer Achse – mit 2 Elektromotoren – oder auf beiden Achsen – mit 4 Elektromotoren. Ein solcher radselektiver Antrieb erlaubt den Einsatz von Torque Vectoring. Zusätzlich bietet der Antrieb mit den 4 Elektromotoren eine Allradfunktion höchster Ausprägung, d. h. dem Einprägen eines Drehmoments um die Fahrzeughochachse über unterschiedliche Radmomente.

Fahrzeugarchitekturen von klassischer Prägung mit Fokus auf Verbrennungsmotoren, vor allem charakterisiert durch einen dominanten Vorderwagen mit dem Motorraum, stehen vor einer grundlegenden Veränderung hin zu Elektrofahrzeugarchitekturen. Vorreiter ist Tesla, der als Neueinsteiger keine Vergangenheit mit Verbrennungsfahrzeugen hat. Nun folgen mit ihren elektrofahrzeug-spezifischen Plattformen die etablierten Automobilhersteller, wie z. B. ID von Volkswagen und EQS von Daimler. Erste Aufbauten mit einem Sandwichboden waren bereits in der A-Klasse zu sehen. Dieser Ansatz wurde nun konsequent in der EQS-Plattform umgesetzt. Siehe Bild 1.15.

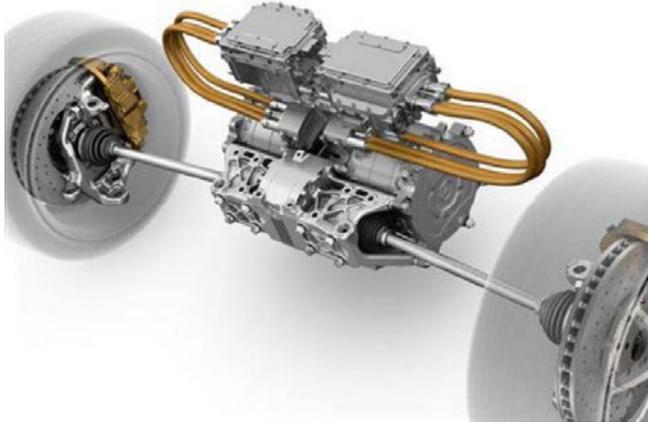


Bild 1.13: Konfiguration mit 2 Elektromaschinen auf einer Achse nach [7]



Bild 1.14: Beispiel Einzelradantrieb nach [7]

1.2 Elektrik/Elektronik im Automobil

Als Querschnittsthema hat die Elektrik/Elektronik inzwischen nahezu alle Domänen der Fahrzeugtechnik durchdrungen. Innovationen ohne Elektrik/Elektronik sind heute nahezu undenkbar. Bereits in den 1990er Jahren postulierte Dr. Schleuter, damals Leiter E/E bei der Audi AG, dass 80 % der Innovationen im Automobil durch Elektrik/Elektronik ermöglicht werden.

Neben den klassischen Fahrzeugfunktionen wie Motor- und Getriebesteuerungen, elektrische Lenkkräftunterstützung und Bremsregelsysteme sowie eine Vielzahl an Komfort- und Sicherheitssystemen mit einer starken Ausrichtung auf die Fahrzeugfunktion etablieren sich immer mehr, über die einzelnen Steuergeräte hinweg vernetzte Funktionen und Innovationen zur Elektromobilität und zum automatisierten Fahren mit einem starken Fokus auf den Kunden.

Die Elektrik/Elektronik leistet einen maßgeblichen Anteil für das Automobil bei der Transformation vom Verkehrsmittel mit ergänzenden Informations- und Kommunikationssystemen zum Digitalen Produkt, das zugleich nachhaltige und klimafreundliche Mobilität anbietet, wie ein Beispiel in Bild 1.15 zeigt.



Bild 1.15: links: Fahrzeugaufbau mit flacher Batterie im Boden, rechts: Modularer Aufbau der Batterie (Quelle: Daimler Pressefoto und Mercedes-Benz Cars, 2021)

1.2.1 Historie der Elektrik/Elektronik im Automobil

Bereits bei der Erfindung des Kraftfahrzeugs durch Carl Benz mit seinem Patent Motorwagen Nummer 1 spielte die Elektrik eine wichtige Rolle. Die Zündung, die ursprünglich mit einer Zündflamme ähnlich wie in einem Gasdurchlauferhitzer ausgestattet war, versagte bei den ersten Versuchen außerhalb der Werkstatt Ihren Dienst, weil die Zündflamme durch Wind ausgeblasen wurde. Daraufhin ersetzte Carl Benz sie durch eine elektrische Zündung.

Einfache elektrische Komponenten prägten über viele Jahrzehnte das Bild im Fahrzeug. Generator, Anlasser, Batterie, Zündung, Beleuchtung, Blinker, Scheibenwischer und Hupe bildeten ein überschaubares elektrisches Netzwerk, das keine funktionalen

Vernetzungen aufwies und mittels Schmelzsicherungen abgesichert war. Das Licht wurde über elektromechanische Schalter bedient, die Blinkfunktion über das sogenannte Blinker-Relais realisiert. Der Antrieb des Scheibenwischers erfolgte über ein aufwendiges Gestänge, das einen mechanischen Umschaltmechanismus beinhaltete. Die Zündung wurde mit elektromechanischen Mitteln realisiert, mit einer Zündspule, einem Unterbrecher und einem Zündverteiler, der die Zündkerzen im Takt des Motors bediente.

In gut ausgestatteten Fahrzeugen kam schließlich ein Autoradio als erste elektronische Komponente hinzu. Ab 1970 kamen dann die ersten elektronischen Zündanlagen zum Einsatz. Der Einsatz von Regelungselektronik blieb zu dieser Zeit hauptsächlich militärischen Systemen und Anwendungen für Luft- und Raumfahrt vorenthalten und basierte zu einem sehr großen Anteil auf diskreten Schaltungen und einigen wenigen integrierten Schaltkreisen.

Erst die Entwicklung integrierter Schaltkreise für Massen Anwendungen in der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik hat Mitte der 1970er Jahre schließlich auch die Automobiltechnik erfasst und führte zu einer deutlichen Zunahme an elektronischen Systemen im Fahrzeug. Diese Systeme waren nicht vernetzt und wurden mit Analogsignalen, wie z. B. Klemmen, in den gewünschten Funktionszustand versetzt.

Ab 1980 kamen Motor- und Zündsteuergeräte immer mehr zum Einsatz und erste Vernetzungen mit dem Datenbus Controller Area Network CAN wurden eingeführt. In den 1990er Jahren wurden elektronische Steuergeräte für Motormanagement und ABS zum Standard in allen Fahrzeugklassen. Elektronische Stabilitätskontrolle und Airbag fanden mehr und mehr Verbreitung. Erste Navigations- und Fahrerinformationssysteme und neue Komfortsysteme erhöhten die Durchdringung mit elektronischen Steuergeräten. Die komplexere Vernetzung wurde mit einem Mix aus analogen und digitalen Signalen realisiert.

Im Jahr 2000 erreichten die Modelle Mercedes-Benz S-Klasse und BMW 7er mit ca. 80 Steuergeräten einen neuen Spitzenwert. Es wurden ca. 4 km Kabel notwendig, um die Steuergeräte untereinander zu verbinden und an der Versorgung anzuschließen. Elektronische Systeme zur Stabilisierung während Verzögerungs- und Beschleunigungsphasen und Airbag Systeme entwickelten sich ebenfalls schnell zum Standard in allen Fahrzeugklassen.

Nach 2000 nimmt die Durchdringung aller Bereiche der Fahrzeugtechnik mit elektronischen Systemen stetig zu, so dass eine Aufzählung der Innovationen den Rahmen des Buches sprengen würde. Immer mehr Displays und Fahrerassistenzsysteme halten Einzug und migrieren von der Oberklasse über die Mittelklasse in die Kompaktklasse und weiter in die kleinen Fahrzeuge. Dieser Trend hält bis heute an und wird durch Hybridisierung, Elektromobilität und autonomes Fahren noch weiter verstärkt.

Die Stromversorgung aller Steuergeräte einschließlich der angeschlossenen Sensoren und Aktuatoren wurde zu einer neuen Herausforderung. Die Generator- und Batteriegrößen mussten den höheren Anforderungen hinsichtlich mittlerer Leistungen

und Spitzenströmen im Betrieb sowie der Summe der Ruhestrome im abgestellten Zustand angepasst werden, wie Bild 1.16 zu entnehmen ist.

Mit fast jeder neuen Fahrzeuggeneration wurde die Generatorgröße erhöht. Mit 250 A Ausgangsstrom wurde ein technisch noch sinnvolles Maximum erreicht. Die Batterien der ersten Generationen basierten auf Blei-Säure-Technologie und ihre Größen wurden mit jeder Generation erhöht. Mit dem Umstieg auf die AGM-Technologie 2001 konnte die Batteriegröße reduziert und über zwei Generationen stabil gehalten werden, bevor 2015 mit dem Einsatz von zwei Batterien ein neuer Summen-Maximalwert von 150 Ah erreicht wurde.

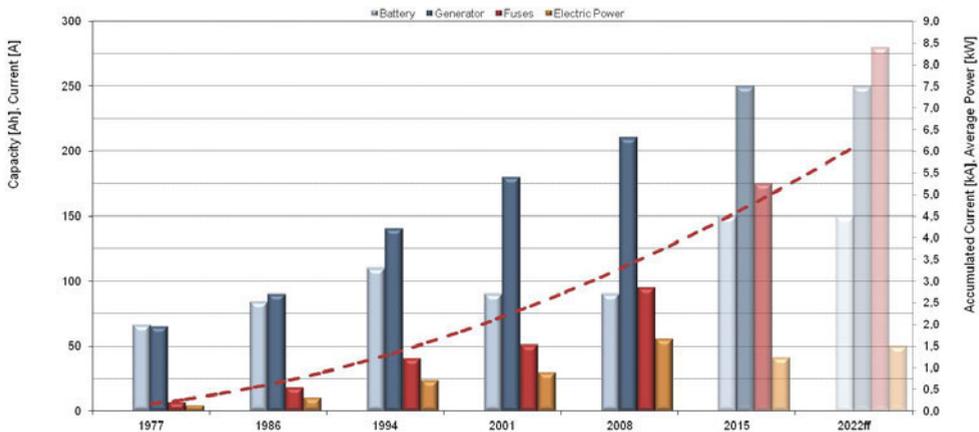


Bild 1.16: Zunahme der Generator- und Batteriegrößen sowie akkumulierte Sicherungsströme und mittlerer Leistungsbedarf am Beispiel BMW 7er mit Prognose für 2022 ff [8]

1.2.2 Das Bordnetz im Automobil

Meist wird das Bordnetz im Fahrzeug mit dem physischen Bordnetz gleichgesetzt und häufig auch als Kabelbaum bezeichnet, siehe auch Bild 1.17. Es stellt sämtliche elektrischen Verbindungen zwischen allen elektrischen und elektronischen Komponenten im Fahrzeug dar, sowohl in logischer als auch in versorgungstechnischer Hinsicht. Diese eingeschränkte Sicht auf das Bordnetz entspricht nicht den tatsächlichen Gegebenheiten. In den Kapiteln 4 bis 7 wird das Gesamtsystem, bestehend aus logischem und technischem Bordnetz, in allen seinen Teilaspekten detailliert erläutert.

Betrachtet man zunächst wieder singular die Verkabelung in den Fahrzeugen, so wuchs diese von einer sehr überschaubaren Anzahl von 40 Kabeln in den 1950er Jahren synchron mit der Zunahme der elektronischen Systeme auf eine Anzahl von mehreren hundert Kabeln bzw. Kabelabschnitten an und erreichte in hoch ausgestatteten Fahrzeugen mehrere Kilometer kumulierte Leitungslänge, wobei dies nur durch die Verlagerung von kabelgeführten Einzelsignalen auf Datenbusse gelang. Der Kabelbaum hat sich mit einem Gesamtgewicht von z. T. deutlich über 25 kg nach

dem Verbrennungsmotor zum zweitschwersten Teilsystem im Fahrzeug entwickelt. Er spielt aufgrund seines Volumens in der geometrischen Gestaltung eine maßgebliche Rolle und stellt inzwischen auch einen wesentlichen Kostenblock dar. Zum einen begründet durch die Menge an Kupfer und anderen hochwertigen Materialien und zum anderen durch den sehr hohen manuellen Fertigungsanteil. Die Vielzahl der Sonderausstattungen und die länder- oder marktspezifischen Konfigurationen in den Fahrzeugen sorgen zusätzlich für eine sehr hohe Variantenvielfalt. Dies führt zu weiteren, nicht vernachlässigbaren Kosten.



Bild 1.17: Bordnetz eines BMW 3er (Quelle: BMW Group)

Zukünftige Bordnetze werden einerseits weiter an Umfang zunehmen. Andererseits ist es zwingend erforderlich, die Effizienz deutlich zu steigern. Die Zunahme des Umfangs beruht auf der Tatsache, dass neue Funktionen und vor allem auch autonomes Fahren ihren Tribut fordern. Die Aufgabe für zukünftige Entwicklungen besteht darin, diese Zunahme so zu gestalten, dass sich daraus keine zusätzliche Komplexität und keine weiteren Kosten- und Gewichtssteigerungen ergeben. Mit neuen Ansätzen für eine maschinelle Fertigung von Teilkabelbäumen sowie deren Standardisierung und der Übergang zu neuen Architekturen werden eine Verbesserung der Situation erwartet.

Die Steigerung der Effizienz ergibt sich aus der allgemeinen Forderung, sorgsam mit den Ressourcen zu haushalten und letztlich mit der Verpflichtung zu einer nachhaltigen Wirtschaft für eine bessere Zukunft.