

ATZ/MTZ-Fachbuch

Horst E. Friedrich
Gerd Müller *Hrsg.*

Werkstoffe und Bauweisen in der Fahrzeugtechnik

 **BASF**
We create chemistry

 Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

In der Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch vermitteln Fachleute, Forscher und Entwickler aus Hochschule und Industrie Grundlagen, Theorien und Anwendungen der Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Die komplexe Technik, die moderner Mobilität zugrunde liegt, bedarf eines immer größer werdenden Fundus an Informationen, um die Funktion und Arbeitsweise von Komponenten sowie Systemen zu verstehen. Fahrzeuge aller Verkehrsträger sind ebenso Teil der Reihe, wie Fragen zu Energieversorgung und Infrastruktur.

Das ATZ/MTZ-Fachbuch wendet sich an Ingenieure aller Mobilitätsfelder, an Studierende, Dozenten und Professoren. Die Reihe wendet sich auch an Praktiker aus der Fahrzeug- und Zulieferindustrie, an Gutachter und Sachverständige, aber auch an interessierte Laien, die anhand fundierter Informationen einen tiefen Einblick in die Fachgebiete der Mobilität bekommen wollen.

Horst E. Friedrich • Gerd Müller
Hrsg.

Werkstoffe und Bauweisen in der Fahrzeugtechnik

Hrsg.
Horst E. Friedrich
Bureaux.HEF
Tapfheim, Deutschland

Gerd Müller
Institut für Land- und Seeverkehr
Technische Universität Berlin
Berlin, Deutschland

ISSN 2628-104X
ATZ/MTZ-Fachbuch

ISSN 2628-1058 (electronic)

ISBN 978-3-662-65268-8

ISBN 978-3-662-65269-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65269-5>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Eric Blaschke

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Vorwort

Werkstoffe und Bauweisen sind Schlüsseltechnologien im Automobilbau. Denn nichts, das an einem Fahrzeug dargestellt ist, wäre nicht auch mit den Werkstofftechniken realisiert worden.

Das Buchkonzept folgt der Logik, wonach fahrzeugtechnische Innovationen vorrangig durch eine integrale Betrachtung der drei Bereiche Werkstoffe (deren Eigenschaften), Bauweisen (der Art der Konstruktion) und Verfahren (der Herstellung, Verarbeitung und Montage) entstehen können. Folglich kommen Werkstoffen und Bauweisen eine querschnittliche Systemrolle in der Produktentstehung von Fahrzeugen zu.

Das Unterfangen nun, wichtige Bereiche dieses Systems in einem Buch zu behandeln, mag gewagt erscheinen. So wird im vorliegenden Werk der Versuch unternommen, die relevanten technischen Strategien in mehreren Kapiteln ganzheitlich zu vermitteln – von der Entstehung moderner Bauweisen über die Anforderungen an Werkstoffe in Karosserie, Fahrwerk und Antrieb über die Königsdisziplin Leichtbau bis hin zur inzwischen obligatorischen ökologischen Bewertung entsprechender Lösungen.

Das Buch beruht in weiten Abschnitten auf den Vorlesungen des Herausgebers an der Universität Stuttgart und der Technischen Universität Berlin sowie in ausgewählten, aktualisierten Teilen auf seinem ATZ/MTZ-Fachbuch „Leichtbau in der Fahrzeugtechnik“. Gezeigt werden automobil-werkstoffliche Entwicklungsschritte der letzten Jahrzehnte sowie – mit vielen Beiträgen aus der Industrie – zusätzlich deren Neuerungen zur Elektromobilität. Die ergänzende Darstellung spezieller Forschungsthemen aus dem Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, soll neuere Forschungsarbeit beispielhaft repräsentieren.

Dem starken Anwendungsaspekt wird durch ausgewählte, zukunftsfähige Werkstofflösungen in diesem Buch Rechnung getragen. Deswegen werden in einem Kapitel aktuell auch veränderte Paradigmen zur Transformation in der Automobilindustrie und der Rolle von automatisierten, modularen oder elektrifizierten Fahrzeugkonzepten adressiert. Ein abschließendes Kapitel versucht, die Evolution von Werkstoff- und Bauweisen-Systemen in die Zukunft zu skizzieren.

Dieses Buch richtet sich an Ingenieure, Techniker sowie Lehrende, Forschende und Studierende im Bereich Fahrzeugtechnik. Es wendet sich an alle technisch Interessierten, denen eine bessere Karosserie, ein effizienteres Fahrwerk, umweltgerechtere Antriebe

usw., letztlich das zukunftsfähige Auto, die bessere Lösung darstellt. Dies gemäß dem Sir Henry Royce zugeschriebenen Satz: „Strebe in allem, was du tust, nach Perfektion. Nimm das Beste, das es gibt und mache es noch besser. Falls es nicht existiert, schaffe es.“

Die Komplexität, die inzwischen die hohe Leistungsfähigkeit der technischen Systeme in unseren Fahrzeugen ausmacht, ist bestimmt einer der Gründe dafür, dass ein Einzelner schwerlich in der Lage sein dürfte, alle Aspekte und Zusammenhänge der angesprochenen Themen ganzheitlich zu behandeln. Mein besonderer Dank gilt daher allen Autoren und Autorinnen dieses Buches für ihre konstruktive und koordinierte Mitarbeit. Das Team der Beitragenden besteht neben dem Herausgeber aus Persönlichkeiten der Forschung und der Automobilindustrie sowie ihren Mitarbeitern. Auch danke ich Dr. Gerd Müller von der TU Berlin, der neben inhaltlichen auch viele grafische Überarbeitungen in der Hand hatte. Erwähnenswert scheint mir insgesamt, dass der Dialog zwischen Wissenschaft/Hochschulen und Anwendung/Industrie hier intensiv und mit vielen gegenseitigen und wertvollen Anregungen weitergeführt werden konnte.

Dem Springer-Verlag und seinem Lektorat sei für den Support und die weitsichtige Mitarbeit gedankt. Nicht zuletzt ist der BASF SE, Ludwigshafen, für die fachliche und materielle Unterstützung bei der Entstehung dieses Buches sehr zu danken, welches ohne diese Mithilfe so nicht hätte realisiert werden können.

Berlin
2024

Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich

Inhaltsverzeichnis

1	Werkstoffe als Treiber von Innovationen	1
	Horst E. Friedrich und Gerd Müller	
1.1	Zum Umfeld des Themas	1
1.2	Schlüsseltechnologie Werkstoffe und Bauweisen im Automobil	3
1.3	Was bisher geschah	5
1.4	Materialanteile im Automobilbau	22
1.5	Anforderungen an Fahrzeuge	28
	Literatur	35
2	Allgemeine Bauweisen	39
	Horst E. Friedrich und Gerd Müller	
2.1	Modulbauweise	39
2.2	Differenzialbauweise	41
2.3	Integralbauweise	43
2.4	Verbundbauweisen	48
2.5	Hybridbauweise und Multimaterialansatz	52
	Literatur	54
3	Relevante Werkstoffe und Werkstofftechniken im Fahrzeugbau	57
	Manuel Otto, Horst E. Friedrich, Dan Dragulin, David Klaumünzer, Ashley Stone, Oliver Schauerte, Josef R. Wunsch, Klaus Drechsler, Sebastian Strauß, Jürgen Becker und Helmut Rudigier	
3.1	Stahllegierungen	57
3.2	Aluminiumlegierungen	81
3.3	Magnesium	106
3.4	Titanwerkstoffe	153
3.5	Polymerwerkstoffe im Fahrzeug	166
3.6	Faserverstärkte Kunststoffe der Fahrzeugstruktur	187
3.7	Oberflächen und Schichten	231
3.8	Kunststoffentwicklungen für die E-Mobilität	267
	Literatur	278

4 Leichtbau	293
Horst E. Friedrich und Gerd Müller	
4.1 Motivation für die „Königsdisziplin“ Leichtbau	293
4.2 Kenngrößen	311
4.3 Allgemeine Auslegungsstrategien und Leichtbaustrategien	324
4.4 Stoffleichtbau	326
4.5 Formleichtbau	328
4.6 Konzeptleichtbau	330
4.7 Bedingungsleichtbau und periphere Maßnahmen	333
Literatur	334
5 Bauweisen der Karosserie	337
Gerd Müller, Horst E. Friedrich, Oliver Schauerte, Gerhard Kopp, Marco Münster, Josef Wunsch, Elmar Beeh und Martin Kober	
5.1 Anforderungen an die Karosserie	337
5.2 Eigenschaften und Kennwerte der Karosserie	358
5.3 Energieabsorbierende Strukturen und Materialien	364
5.4 Forschungsthema: Vorderwagenstruktur mit einfach adaptierbaren Crasheigenschaften	374
5.5 Status und Trends zu wichtigen Bauweisen	384
5.6 Fügetechniken in Abhängigkeit von Werkstoffen und Bauweisen	401
5.7 Forschungsthema: Ring-Struktur/Sandwichbauweise	417
5.8 Herausforderungen bei der E-Mobilität	431
Literatur	437
6 Bauweisen des Fahrwerks	443
Andreas Höfer, Horst E. Friedrich und Gerhard Kopp	
6.1 Anforderungen und Konzeption von Fahrwerkskomponenten	443
6.2 Überblick über Bauweisen und Werkstoffe in Fahrwerkskomponenten	447
6.3 Leichtbau im Fahrwerk	457
6.4 Zur Evolution des Fahrwerkes hinsichtlich der Elektromobilität	480
6.5 Forschungsthema Fahrwerk DLR LEICHT	488
Literatur	492
7 Bauweisen des Antriebsstranges	497
Bernd Grünenwald, Thomas Feldhege, Andreas Geyer, Matthias Türpe, Hans-Jürgen Schneider, Oliver Schauerte, Daniel Freidank, Frank Rinderknecht, Lars Heber, Martin Kober, Werner Kraft und Simone Ehrenberger	
7.1 Anforderungen und Werkstoffspektrum	498
7.2 Komponenten des Verbrennungsmotors	508
7.3 Komponenten des Thermomanagements und der Klimatisierung	528
7.4 Herausforderungen für den elektrischen Antriebsstrang	550

7.5	Anwendungsbeispiele zur E-Mobilität und ihren Komponenten	582
7.6	Spezielle Bauweisen neuartiger Antriebsstrang – Komponenten in der Forschung	599
	Literatur	611
8	Paradigmenwechsel für die Werkstoffwahl	615
	Simone Ehrenberger, Peter Saling, Manuel Otto, Jochen Engelmann, Benjamin Frieske und Sylvia Stieler	
8.1	Life Cycle Assessment als Entscheidungshilfe	616
8.2	Ökologische Bewertung von Fahrzeugwerkstoffen	623
8.3	Werkstoffe und Bauweisen im End-of-Life-Konzept	633
8.4	Resilienz von Lieferketten und robuste Strategien für die automobiler Transformation	640
	Literatur	657
9	Werkstoffsysteme mit Zukunft	663
	Horst E. Friedrich, Oliver Schauerte, Gerhard Kopp, Josef Wünsch, Jochen Engelmann, Daniel Freidank, Axel Gottschalk, Patrick Keil, David Heyner, Elmar Beeh, Marco Münster und Volker Grienitz	
9.1	Potenziale der Smart Systems	664
9.2	Additive Manufacturing und 3D-Druck	673
9.3	Verbunde mit Holz	683
9.4	Schlüsselfaktoren Batterie und Brennstoffzelle für die Elektromobilität	704
9.5	Neue computerunterstützte Ansätze in der Werkstoffentwicklung	734
9.6	Moderne Fahrzeug- und Bauweisenkonzepte für die Transformation des Automobils	745
	Literatur	755
	Stichwortverzeichnis	763

Autorenverzeichnis

- Dr. Jürgen Becker** Geisenheim, Deutschland
- Dr. Elmar Beeh** DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Dan Dragulin** HANOMAG Härtecenter GmbH, Hannover, Deutschland
- Prof. Dr. Klaus Drechsler** TU München, Garching bei München, Deutschland
- Simone Ehrenberger** DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Jochen Engelmann** BASF, Ludwigshafen, Deutschland
- Thomas Feldhege** MAHLE, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Daniel Freidank** BASF Polyurethanes GmbH, Lemförde, Deutschland
- Prof. Dr. Horst E. Friedrich** Bureaux.HEF, Tapfheim, Deutschland
- Benjamin Frieske** DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Andreas Geyer** MAHLE, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Axel Gottschalk** BASF, Ludwigshafen, Deutschland
- PD Dr. Volker Grienitz** Neue Mobilität Paderborn e.V., Paderborn, Deutschland
- Dr. Bernd Grünenwald** MAHLE, Stuttgart, Deutschland
- Lars Heber** DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- David Heyner** DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Andreas Höfer** Valeo Siemens eAutomotive, Erlangen, Deutschland
- Dr. Patrick Keil** BASF, Münster, Deutschland
- Prof. Dr. David Klaumünzer** HAW Hamburg, Hamburg, Deutschland
- Dr. Martin Kober** DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland
- Dr. Gerhard Kopp** DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland

Werner Kraft DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland

Dr. Gerd Müller Institut für Land- und Seeverkehr, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland

Dr. Marco Münster DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland

Dr. Manuel Otto SSAB Europe, Düsseldorf, Deutschland

Dr. Frank Rinderknecht DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, Deutschland

Dr. Helmut Rudigier Oerlikon Management AG, Pfäffikon, Schweiz

Prof. Dr. Peter Saling BASF, Ludwigshafen, Deutschland

Dr. Oliver Schauerte Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

Hans-Jürgen Schneider ZF, Werneck, Deutschland

Sylvia Stieler IMU Institut, Stuttgart, Deutschland

Ashley Stone MAXImolding! Technology GmbH, Siegsdorf, Deutschland

Dr. Sebastian Strauß Fraunhofer Institut für Gießerei, Composite und Verarbeitungstechnik IGCV, Augsburg, Deutschland

Prof. Dr. Matthias Türpe MAHLE, Stuttgart, Deutschland

Dr. Josef Wunsch BASF S.E., Ludwigshafen, Deutschland



Horst E. Friedrich und Gerd Müller

1.1 Zum Umfeld des Themas

Mit zunehmender Verkehrsdichte und durch gesellschaftliche und ökologische Veränderungen wurden die Anforderungen an Fahrzeuge aller Art in den letzten Jahren immer komplexer und anspruchsvoller. In unserer Zeit ist die ökologische Verträglichkeit dabei auf einen der vorderen Plätze in der Bedeutungsskala gerückt. Neben Endlichkeit und Schutz der Ressourcen sorgen die notwendigen Reaktionen auf den Klimawandel für eine vor Jahren noch nicht für möglich gehaltene Transformation in der Automobilindustrie: Es sind die Verringerung von Emissionen in Herstellung und Betrieb, vor allem Zero-CO₂-Strategien, automatisierte Fahrzeuge mit effizienten und alternativen Antrieben und der Umbau des Energiesystems, welche die Mobilität jetzt zukunftsfähig machen müssen. Wohl jedem ist inzwischen klar geworden, dass fossile Energieträger keine Zukunft haben, wenn der CO₂-Ausstoß zu sinken hat. Der vom Mensch verursachte Klimawandel ist vermutlich das gefährlichste Experiment, das unser Planet je erlebt hat.

Dabei ist und bleibt Mobilität offensichtlich seit jeher ein globales Grundbedürfnis.

Es besteht – zumindest bisher – ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Wohlstand und der Transportleistung in einem Land. In Abb. 1.1 sind diese Zusammenhänge für verschiedene Regionen dargestellt, vgl. dazu auch die Kfz-Dichte als Anzahl von Fahrzeugen pro 1000 Einwohner (Tab. 1.1).

H. E. Friedrich (✉)
Bureaux.HEF, Tapfheim, Deutschland

G. Müller
Institut für Land- und Seeverkehr, Technische Universität Berlin, Berlin, Deutschland
E-Mail: gerd.mueller@tu-berlin.de

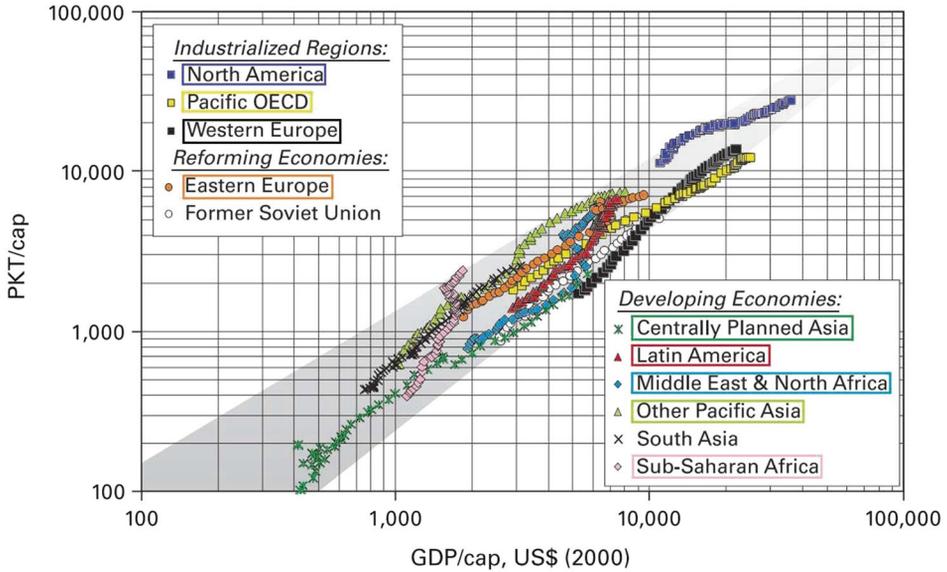


Abb. 1.1 Qualitativer Zusammenhang zwischen Wohlstand und der Transportleistung: Personen-kilometer pro Kopf (engl. „passenger kilometers traveled (PKT) per capita“) über das pro Kopf BIP in Kaufkraftparität (engl. „gross domestic product (GDP) per capita“) in ausgewählten Regionen zwischen 1950 und 2005, nach [1] (Bruttoinlandsprodukt)

Tab. 1.1 Kfz-Dichte ausgewählter Regionen

Region	Anzahl Kfz pro 1000 Einwohner
USA	ca. 800
Europa	500–600
China	ca. 250

Demzufolge kann festgehalten werden:

1. Je höher der Wohlstand ist, desto höher ist auch die Transportleistung. Besonders auffällig sind die hohe Transportleistung in Nordamerika und die (noch) relativ geringe in China.
2. Der Wohlstand und die Transportleistung sind in den meisten Regionen stetig gestiegen. Bedeutsam ist die starke Zunahme in Asien, insbesondere in China.

Wir gehen davon aus, dass infolge der Zunahme von elektronischer Kommunikation der lineare Zusammenhang von Transportleistung und Kaufkraftparität aufgelöst wird. Die aktuellen technischen Möglichkeiten und zunehmend seit 2020 die Veränderungen zur Präsenzreduzierung infolge der Corona-Pandemie (COVID19) beschleunigten diese Entwicklung.

In Abb. 1.1 war die bisher weltweite Kongruenz in der Zunahme von Reiseleistung (km pro Kopf) und Einkommen gezeigt, dabei ist das Auto gerade für Transportleistungen in die Fläche das Verkehrsmittel der Wahl, wie in Abb. 1.2 skizziert ist. Hier zeigt sich die Robustheit des Individualverkehrs mit dem PKW sowohl für sehr unterschiedliche Reiseleistungen (km) als auch Raumstrukturen.

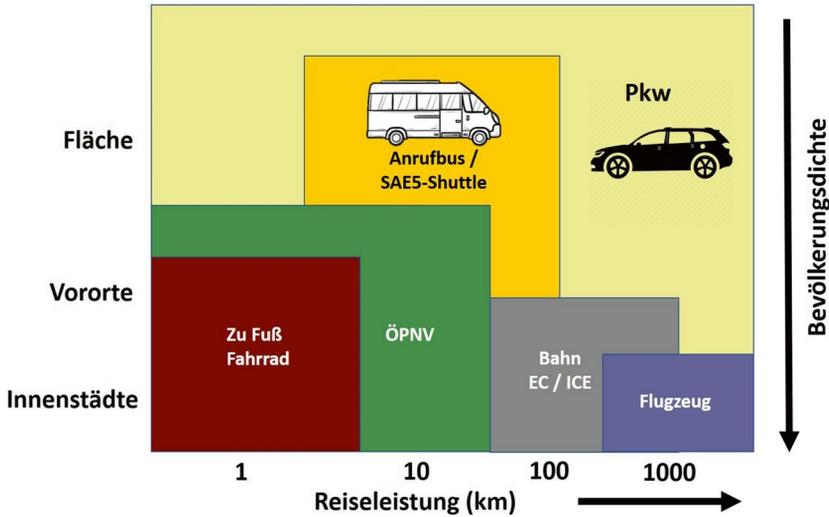


Abb. 1.2 Verkehrsmittel nach Reiseleistung und Raumstruktur, schematisch

Es ist davon auszugehen, dass der in Abb. 1.2 skizzierte Bereich des klassischen Anrufbusses durch die künftige Integration selbstfahrender SAE5¹-Shuttles ins Verkehrssystem sowohl bezüglich der Reiseleistung als auch der Fläche erweitert wird. Dies kann modulare People Mover oder Shuttles, Taxis oder Limousinen betreffen, mögliche Bauweisenimplikationen werden in Kap. 9 angesprochen.

1.2 Schlüsseltechnologie Werkstoffe und Bauweisen im Automobil²

Mobilität gilt als ein Grundbedürfnis der Menschheit. Das betrifft den Beginn der Menschwerdung in Afrika und der kulturellen Entwicklung in allen Erdteilen und setzt sich kontinuierlich fort.

Weltweit stehen wir jetzt vor Herausforderungen, deren erfolgreiche Bewältigung die Voraussetzung für das zukünftige Wohlergehen der Menschen sein wird. Durch die wachsende Weltbevölkerung und den im Mittel steigenden Wohlstand entsteht ein deutlicher Bedarf an mehr Mobilitätsleistung und neuen Mobilitätsmustern. Die absehbare Endlichkeit der fossilen Energien, die derzeit noch einen Großteil unserer Verkehrsleistungen ermöglichen, zwingt zu neuen Lösungen bei den Fahrzeugkonzepten, ihren Antrieben und Energieträgern. Mehr noch besteht darüber hinaus heute Konsens, dass die Freisetzung der

¹Höchste Automatisierungsstufe nach Klassifikation der Society of Automobile Engineers.

²Teile der Kapitel 1.2 bis 1.4 adaptiert nach *Leichtbau als Treiber von Innovationen* von H. E. Friedrich und S. Krishnamoorthy in: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, 2017; mit freundlicher Genehmigung von © Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017. All Rights Reserved.

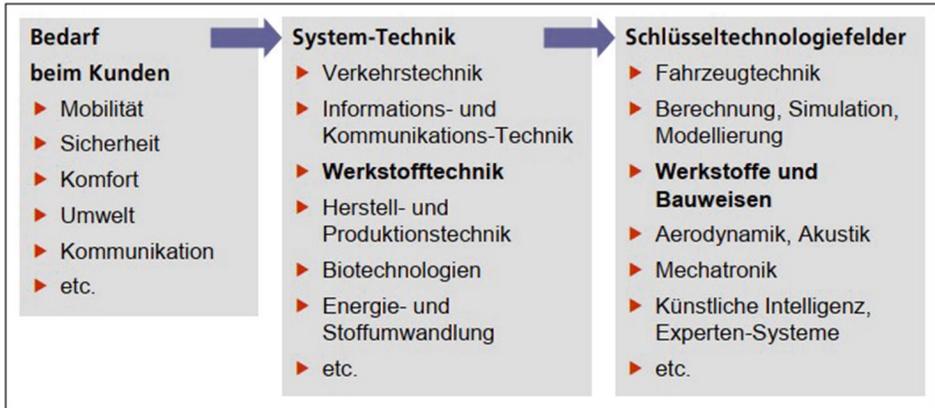


Abb. 1.4 Schlüsseltechnologien

Übergeordnet betrachtet beantworten Schlüsseltechnologien die Aufgaben aus den gesellschaftlichen Grundbedürfnissen, dazu gehören auch Mobilität, Sicherheit oder Umwelterhaltung. Hier helfen die Systemtechniken, das können die Verkehrstechnik, die Energie- und Stoffumwandlung oder eben die Werkstofftechnik sein. In der hierarchisch nachfolgenden Ebene der Schlüsseltechnologiefelder sind für unser Thema die Werkstoffe und Bauweisen platziert (Abb. 1.4) Diese verstehen wir als eine obligatorische Kernkompetenz für die Erfüllung der zahlreichen, teilweise gegensätzlich vernetzten Anforderungen im Fahrzeugbau [4–6]. Eine herausragende Bedeutung kommt dabei dem Leichtbau zu, den wir explizit in Kap. 4 behandeln.

1.3 Was bisher geschah ...

Mit den ersten Automobilen des 19. Jahrhunderts kamen die Werkstoffe zum Einsatz, die dem damaligen Stand der Technik entsprachen. Somit hatten diese Gefährte mit einer aus heutiger Sicht relativ bescheidenen Werkstoffvielfalt zu reüssieren. Die vorhandenen Materialien aus dem Kutschenbau für das Fahrwerk und den Aufbau sowie die Eisen- und Buntmetalle aus dem stationären Motorenbau für das Antriebsaggregat waren, so ist in [5] zu lesen, der Ausgangspunkt für die danach und wesentlich durch das Automobil getriebenen Werkstoffentwicklungen.

Mit Beginn des 20. Jahrhunderts wurde begonnen, die Fahrzeugrahmen durch Holz- und Eisenrahmen und dann später durch gepresste Teile zu bauen. Dadurch konnte die Tragfähigkeit bei niedrigerem Gewicht verbessert werden.

Als Material für die Karosserien kam zunächst und in erster Linie Holz zum Einsatz, ein Werkstoff, der auch heute wieder für gezielte Einsatzfelder im Fahrzeugbau untersucht wird. Des Weiteren fanden sich damals vereinzelt bereits Aluminiumbleche oder Kombinationen von Holz und Metall. Einteilige Motorhauben beispielsweise konnten häufig schon aus Aluminiumblech gebaut werden.

Holzbauweisen blieben indes, wie zunächst auch im Flugzeugbau im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts, eine Schlüsseltechnologie. Für die Karosserieaufbauten verwendete man entsprechend der verwendeten Holzsorte eine mehrlagige Grundierung, die aufgespachtelt wurde und dann über Tage austrocknen musste, bevor die Decklackierung aufgebracht wurde. Wie im Kutschenbau üblich, hatten die Räder Speichen aus Holz.

Wir werden später sehen, dass aktuelle Holzverarbeitungstechniken, wie sie auch aus der Möbelindustrie bekannt sind, Potenziale für neuartige Holzverbunde erschließen können.

Ein Meilenstein für die Herstellung kostengünstiger Automobile, aber auch für die Verwendung neuer Werkstoffe, ist 1907 das Model T von Henry Ford geworden. Hier wurde ein vanadiumlegierter Stahl für die Vorderachse eingesetzt, der eine höhere Festigkeit als bisherige Stähle aufwies.

Der zunehmende Einsatz von Aluminium in der Zeit zwischen den Kriegen diente dem Ziel, das Gewicht der Fahrzeuge niedrig zu halten. Dies war ein Primat aus dem Bau von Rennwagen und – heute würde man sagen – Premiumsportwagen und realisierte sich in vielen wichtigen Bauteilen, wie z. B. Kurbelgehäuse, Getriebegehäuse und Blechen in der Karosserie. Vereinzelt kam auch Magnesium zur Anwendung, man kannte es aus dem Flugzeug-/Luftschiffbau und versuchte es selbst in Karosserieanwendungen wie beim Bugatti Atlantique (vergl. Abschn. 1.4).

Die Ganzstahlkarosserie wurde durch die Firmen Dodge und Pontiac 1913/15 erstmals in die Serienproduktion eingeführt. Damit gelangen deutlich höhere Biege- und Torsionssteifigkeiten als bei der zuvor angewendeten Mischbauweise mit Holz und Blech. Mit der Stahlkarosserie konnte nun auch die teure Handarbeit reduziert und der Weg zur kostengünstigen Großserienfertigung gebahnt werden. Wie in [5] beschrieben galt: „Voraussetzung dafür war die Entwicklung leistungsstärkerer Pressen für Karosseriebleche, um eine Serienfertigung von entsprechenden Blechteilen in größerer Stückzahl zu ermöglichen. Ford zum Beispiel baute sein T-Modell mit Holzgerippe-Karosserie bis zur Produktionsumstellung im Jahre 1927. Ebenfalls in jenem Jahr präsentierte Krupp ein speziell für Karosserieteile geeignetes Tiefzieh-Feinblech. Weiterhin dominierte die Bauweise eines fahrfähigen Leiterrahmens, auf den anschließend die Karosserie montiert wurde. 1922 präsentierte Lancia das Modell Lambda, welches einen kastenförmig hochgezogenen Rahmen besaß und damit als prinzipiell erstes Fahrzeug mit einer teilweise selbsttragenden Karosserie angesehen werden kann“.

Nach dem Krieg, zuletzt in den 1960er-Jahren reüssierten flächendeckend die selbsttragenden Stahlschalenbauweisen.

In den 90er-Jahren des vorigen Jahrhunderts gelang bei Audi die Serieneinführung mit einer Bauweise vollständig in Aluminium, die als Aluminium-Spaceframe bekannt wurde. Weitere Anwendungen mit Aluminium- und später auch Magnesiumlegierungen folgten im Volkswagen-Konzern und bei anderen Herstellern.

Was den Antriebsstrang betrifft, so ersetzte Aluminium als Werkstoff zunächst für Kolben das Gusseisen in den meisten Verbrennungsmotoren. Später kamen Gehäuseanwendungen dazu, legendär ist der Magnesiumeinsatz im VW Käfer.

Noch vor dem Krieg nahmen auch die Anwendungen mit Kunststoffen zu. Zur Verbesserung des Akustik-/Schwingungskomforts durch Gummilager für den Motor oder generell zur Abdichtung der Karosserie kamen Elastomere zum Einsatz.

Im Mittel verfügte ein Automobil 1955 über ca. 5 kg an Kunststoffen, die meisten Teile erfüllten dekorative Aufgaben [5]. Heute liegt der durchschnittliche Anteil an Kunststoffen bei insgesamt ca. 20 %. Eine weitere Zunahme sehen wir derzeit durch die Elektrifizierung und die Notwendigkeit der Hochvolt-Bauteile im Antriebsstrang.

Hochleistungsfaserverbundkunststoffe, dies adressiert vor allem solche mit Carbonfaser (CF), sind im Rennsport gebräuchlich, aber bis heute noch nicht in größerer Stückzahl in Großserienfahrzeugen verbaut. Sie könnten in Zukunft einen wertvollen Beitrag zum Leichtbau leisten, jedoch wären dafür vor allem serientaugliche und kostenattraktive Herstellverfahren die Voraussetzung.

In Tab. 1.2 wurde versucht, beispielhaft wesentliche Werkstoffinnovationen im Automobilbau seit 1900 aufzulisten.

Tab. 1.2 Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau seit 1900 (Beispiele)

Jahr	Hersteller	Innovation
1900	Maybach/Daimler	Motor aus Al und Mg, Kühler aus Messing
1907	Ford Modell T	Vorderachse aus Stahl mit Vanadium legiert
1913	Dodge	Erstmals Ganzstahlkarosserie
1922	Lancia Lambda	Teilweise selbsttragende Karosserie
1936	Volkswagen Käfer	Mg-Gussteile für Getriebe- und Kurbelgehäuse
1950	Lloyd 300	Hartholz-Fachwerk-Gerippe mit Sperrholzverkleidung
1954	GM Corvette	Stahlkarosserie mit faserverstärkten Polymeraußenteilen
1957	Lotus E	Karosserie aus faserverstärkten Polymeren
1962	Porsche	Titan für Pleuel in einem Formel-1-Motor
1971	Porsche 917	Verwendung von Mg für Gitterrohrrahmen
1980	GM Corvette	Glasfaserverstärkte Blattfedern
1981	McLaren/Lotus	Tragende Struktur aus kohlefaserverstärkten Polymeren
1981	DeLorean MC	Stahlzentralrahmen, faserverstärkte Polymerstruktur mit geschraubten Edelstahlblechen
1994	Audi A8 D2	Voll-Aluminium-Bauweise (ASF)
1996	Volkswagen	Serieneinsatz von Getrieben in Mg-Gehäusen
1999	Audi A2	Al-Spaceframe 2. Generation (Profil, Guss- und Fügetechnik)
1999	VW 3-Ltr.-Lupo	Multimaterialdesign/Leichtbau
2002	VW 1-Ltr.-Auto	Mg-Spaceframe, CFK-Karosserie, Al, Mg, Ti in Fahrwerk und Antriebsstrang
2003	Porsche Carrera GT	C/C-SiC-Bremse, CFK-Karosserie, Edelstahlmodule
2003	BMW 5er	Vorderwagen aus Al
2004	Mercedes SLR	CFK-intensive Mischbauweise
2006	Audi TT	Al- und Stahl-Hybridbauweise (Spaceframe- u. Schalenbau)
2013	BMW i3	CFK-Karosserie + Al-Chassis (Bimodul)
2016	Mercedes E-Klasse	Moderne Mischbauweise in Großserie
2017	Audi A8 D5	Al-intensive Hybridbauweise mit Warmformstählen (Seite, B-Säule), CFK (Heck) und Mg
2020	Mercedes S-Klasse	Al-intensive Mischbauweise Schalenbauweise

1.3.1 Beginn Mobilität in der Bronzezeit?

Schon in frühen Zeiten und dann sogar nach dem Tode scheint der Mensch Wert auf gewisse Formen von Mobilität gelegt zu haben. Als ein anschauliches Beispiel dafür kann der Sonnenwagen von Trundholm dienen, eine Grabbeilage aus der europäischen Bronzezeit, die wir als abstrahierte Vergegenständlichung einer mythischen Sonnenfahrt interpretieren. Die heute im Nationalmuseum von Kopenhagen zu besichtigende, etwa 60 cm messende Skulptur ist aber auch anschaulich im Sinne von zeitgenössischen Werkstoffen und Bauweisen (Abb. 1.5).

Schon das Design, also die Konstruktion, wirkt äußerst filigran und leicht. Man betrachte nur die Ausführung der Räder und Speichen, für die insgesamt sechs Räder des Fahrzeuges ist auch deren Drehbarkeit auf den Achsen nachgewiesen. Interessant ist die integrale Ausführung: Radreifen und Speichen sind ganzteilig aus Bronze gegossen, gewissermaßen als Anwendung eines modernen Konstruktionsprinzips. Ermöglicht wurde dies durch ein Wachsauerschmelzverfahren, um 1400 v. Chr. das bevorzugte Feingussverfahren der mittleren Bronzezeit.

Wir schließen, dass die frühen „Ingenieure“ vor ca. 3400 Jahren sehr wohl schon eine ganzheitliche Vorstellung von konzeptbestimmenden Bauweisen besaßen. Angewandt hatten sie offensichtlich eine geradezu dialektische Beziehung zwischen

1. Werkstoffen (deren Eigenschaften und Verarbeitbarkeit – Bronze war bei geeigneten Temperaturen leicht zu erschmelzen und mit dünnen Wandstärken gut zu vergießen),
2. den Fertigungstechniken (das Gussverfahren ermöglichte eine bildsame und integrierende Ausführung der Objekte) sowie schließlich
3. einem – in diesem Falle auch noch sehr ästhetischen – Konstruktionskonzept (Bauweise).

Abb. 1.5 Sonnenwagen von Trundholm, aus [4]



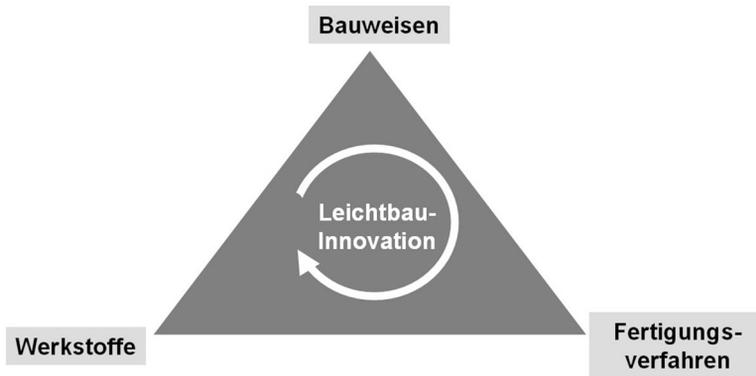


Abb. 1.6 Integrale Betrachtung für Leichtbauinnovationen

Dieser „Triolog“ der ganzheitlichen Betrachtung von Werkstoffen, Fertigungstechniken und Konstruktionen ist heute und immer mehr der eigentliche Treiber für Innovationen mit Werkstoffen. Statt Konstruktion verwenden wir hier den Begriff der Bauweise: Ursprünglich von der Luftfahrt und dem Flugzeugbau geprägt, beschreibt er ingenieurwissenschaftlich zutreffend vor allem auch die kreative Ausführung vieler Leichtbaulösungen (Abb. 1.6).

Die Leichtbaustrategien in der Transporttechnik wandelten sich in den vergangenen ca. 120 Jahren zunehmend vom reinen Stoff- (oder Substitutions-)Leichtbau über den Form- und Fertigungsleichtbau zum konzeptionellen oder systemischen Leichtbau. Der Konzeptleichtbau, der viele oder im Extremfall alle anwendbaren Leichtbaustrategien integriert, ist heute die vorherrschende Lehrmeinung zum Fahrzeugleichtbau [4, 7–9]. Zunächst soll jedoch ein historischer Abriss versucht werden: Triumphe durch Leichtbau.

1.3.2 Triumphe durch Leichtbau: im Rausch der Geschwindigkeit

Ein ganz wichtiger, früher Motivator für den Automobilbau war der Sieg durch Schnelligkeit. Halsbrecherische Autorennen und Flugvorführungen gehörten damals, positiv besetzt und bejubelt, zu den Vorboten einer neuen technischen Epoche: Um die Wende zum 20. Jahrhundert trieben Autorennen die Entrepreneure und Ingenieure der Zeit zu immer neuen Höchstleistungen und zur Leichtbauweise, denn niedriges Gewicht machte schnell!

Camille Jenatzy, ein belgischer Pionier des Motorsports, durchbrach im Frühjahr 1899 mit 105,8 km/h erstmals eine „Schallmauer“: 100 km pro Stunde [10] für Straßenfahrzeuge. Sein Gefährt auf Rädern, übrigens mit einem Elektroantrieb innerhalb weniger Wochen konstruiert und fast mit der Form eines Torpedos, nannte er „La Jamais Contente“ (die nie Zufriedene), (Abb. 1.7), wohl ein weiser und zeitloser Wahlspruch für Leichtbaupioniere überhaupt.

Zur Gewichtsreduzierung wurde eine leichte Legierung des Aluminiums verwendet, die man Partinium nannte (nach ihrem Erfinder G.H. Partin, hergestellt in den Usines des



Abb. 1.7 Camille Jenatton im Rekord-Elektroauto „La Jamais Contente“ mit Gattin bei der Siegesparade, aus [4]

Partinium in Paris [11]). Die Angaben für die genaue chemische Zusammensetzung der kupferhaltigen Aluminiumlegierung variieren, Varianten mit Wolfram und Magnesium wurden für Fahrräder und Automobilteile genannt.

Fahrzeugtechnisch war die vorletzte Jahrhundertwende auch deswegen so interessant, weil mehrere Energieträger – Strom, Benzin und vereinzelt auch Dampf – für die Automobile vorkamen (eine bemerkenswerte Ähnlichkeit zu unserer Zeit, in der seit gut 100 Jahren erstmals wieder mehrere Energieträger zeitlich und technisch parallel in den Fahrzeugkonzepten zu sehen sind). Damals konnte man Rennen eben auch elektrisch gewinnen! So zum Beispiel beim Exelberg-Rennen 1902 mit Ferdinand Porsche am Steuer seines „Mixte“-Wagens; dieses Hybrid-Fahrzeugkonzept entwickelte er drei Jahre später in eine leistungsstärkere Version mit einem 70 PS Benzinmotor weiter, jener lieferte mit dem Generator Strom für vier Elektromotoren in den Rädern, mithin auch eine für unsere Zeit potenzialträchtige Integrationslösung.

1.3.3 Bauweisen und Leichtmetalle werden Konzeptmerkmale

Ferdinand Porsche interessiert hier mehr in seiner Eigenschaft als Leichtbaupionier. Lange vor dem Volkswagen, Porsche war noch bei Austro-Daimler als Direktor tätig, beschäftigte

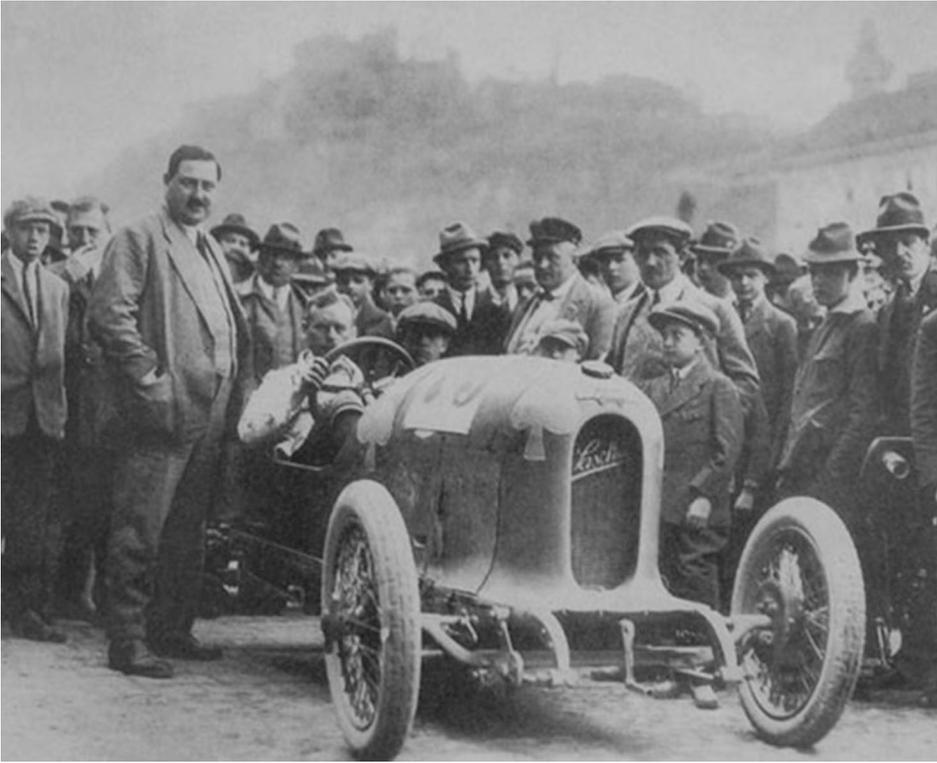


Abb. 1.8 Alexander Graf Kolowrat-Krakowsky (links) mit dem „Sascha“-Wagen, rechts daneben (mit Mütze) der Konstrukteur F. Porsche, aus [4]

er sich mit dem Konzept des kleinen, leichten Wagens. Den Anlass mag Anfang der 1920er-Jahre ein Filmmagnat gegeben haben: Sascha Graf Kolowrat, Lebeamann und Herrenfahrer mit der Intuition für Geschwindigkeit. Es entstanden Prototypen mit 50 PS und Spitzengeschwindigkeiten von 140 km/h. Das zu Ehren des Grafen „Sascha“ genannte Fahrzeug (Abb. 1.8) wog nur 598 kg, wesentlichen Beitrag zu diesem Erfolg hatte die leichte Aluminiumkarosserie [10]. Porsche hatte zielführend zwei Techniktrends aus dem Flugzeug adaptiert: kleinvolumige Motoren mit gesteigerter Kompression und die Anwendung konsequenter Leichtbauprinzipien.

Die Rennhistorie der „Sascha“-Wagen begann 1922 mit dem Straßenrennen der Targa-Florio in Sizilien. Viele europaweite Rennen folgten. Ideen für eine Straßenversion, gar in größeren Stückzahlen zu bauen, kamen indes nicht voran. Es überwiegen zu dieser Zeit im deutschsprachigen Raum noch die Automobile der Oberklasse – bis zur Geburtsstunde des Volkswagens in den 1930er-Jahren. Und wieder ist es Porsche, der auch in dieser Klasse Werkstoffe konsequent einsetzte: mit dem inzwischen legendären Motor (gemeint sind Kurbel- und Getriebegehäuse aus Magnesiumlegierung!), bei dem luftgekühlten Boxermotor im „Käfer“ war dies der konzeptbestimmende Beitrag zur Verringerung der Hecklastigkeit.

1.3.4 Konsequente Weiterentwicklungen bis in die 1930er-Jahre

Auch bei Daimler führt der Weg von ersten Rennsiegen zu Triumphen mit Leichtbau. Der bekannte Namensgeber Emil Jellinek, ein erfolgreicher Geschäftsmann aus Sachsen, meldete mit dem Decknamen „Mercedes“, dem Kosenamen seiner ersten Tochter, einen 23 PS „Phönix“ aus Cannstatt zur Tourenfahrt in Nizza an. Anfang des 20. Jahrhunderts bestand Jellinek auf weitere Leistungssteigerung der Daimler-Fahrzeuge, vor allem, um im Wettbewerb mit französischen Fahrzeugen zu obsiegen und nachfolgende Verkaufsergebnisse zu erzielen. Wie die Bergrennen gezeigt hatten, waren kurze, hohe und schwere Wagen bei großem Tempo nicht wie gewünscht beherrschbar und der geniale Daimler-Konstrukteur Wilhelm Maybach setzte die technische Auffassung um, länger, niedriger und leichter zu bauen [12]. Mehrere „Mercedes“-Wagen wurden erworben und überzeugten in großen Rennen, Rekorden und Wettfahrten.

Viele europäische Automobile jener Zeit verwendeten Holz als Werkstoff für die Karosserie. Aluminiumblech wurde in Ausnahmefällen eingesetzt, so z. B. 1907 von Rolls Royce. Etwas später (1912) folgte von NSU der Typ 8/24 mit einer vollständig aus Aluminium geformten Karosserie (Abb. 1.9). Ford in Amerika hatte auf Einheitstypen und Stückzahlen gesetzt, lange vor dem Volkswagen, der wie damals wenig bekannt geworden war, auf amerikanischen bzw. fordistischen Produktionsmethoden aufbaute. Die Karosserie für das Modell „T“ formte man ab 1908 schnell und kostengünstig aus Stahlblech. Eine werkstoffliche Besonderheit waren vanadiumlegierte Stähle, die eine deutlich höhere Festigkeit als herkömmliche Stähle aufwiesen, mithin ein wertvoller Leichtbaubeitrag. Den Pressstahlrahmen und das Blattfeder-Starrachs-Fahrgestell produzierte man bis 1927. Bereits zehn Jahre vorher war der Preis für ein „T“-Modell von zu Anfang 850 US\$ auf nunmehr 360 US\$ gefallen.

Viele Ingenieure und Unternehmer aus Europa reisten vor dem 2. Weltkrieg in die USA. Sie informierten sich über Fahrzeugmodelle, Bauweisen und Fertigungsmethoden



Abb. 1.9 Aluminium im NSU-Typ 8/24, aus [4]

und profitierten von diesem Technologietransfer. Zwar konnte man die Produktion optimieren, jedoch nicht die erheblich niedrigere Kaufkraft deutscher Kunden (vergl. [13]).

Ab 1935 stellte in Deutschland dann die Firma Opel mit dem „Olympia“ einen Serienwagen in selbsttragender Ganzstahlkarosserie vor. Die zweitürige bzw. viersitzige Einheit aus Stahlblech machte einen Aufbaurahmen überflüssig und diente zugleich für die Aufnahme von Fahrwerk und Triebwerksträgern. Opel setzte die Bauweise mit dem etwas später produzierten „Kadett“ und dem „Kapitän“ fort.

Zu etwa gleicher Zeit kommt ebenfalls in Serienfertigung das Modell „Citroën Traction Avant“ mit einer selbsttragenden Karosserie auf den Markt (Abb. 1.10). Lancia hatte mit dem „Lambda“ zwar schon zuvor revolutionär eine selbsttragende Bauweise in einem offenen Monocoque-Typ dargestellt, doch dann leider nicht weiterverfolgt.

Eine historische Betrachtung über Automobilerfolge und Werkstoffpioniere wäre unvollständig ohne die Erwähnung von Ettore und Jean Bugatti, die gut zwanzig Jahre lang bis zum 2. Weltkrieg die Symbiose von Technik und Design in den automobilen Zenit hoben. Einer der exklusivsten und natürlich auch teuersten Wagen war der Type „57 SC Atlantic“. Dieser Wagen basiert auf einem Prototyp namens Bugatti Electron „Aerolithe“. In dessen Leichtbaukonstruktion wurde „Electron“ verwendet, eine Magnesiumlegierung der IG Farben. Obwohl attraktiv niedrig in ihrer spezifischen Dichte (Magnesiumlegierungen liegen bei nur ca. 1,8 kg pro dm³ gegenüber den bereits leichten Aluminiumlegierungen mit ca. 2,7 kg pro dm³) waren diese Legierungen sehr schwer schweißbar. Daher wurde vermutlich eine Vernietung an Fahrgastzelle (Dach) und Kotflügeln als Verbindungstechnik gewählt, was dem Auto bis zu 50 mm hohe und sehr auffällige Nietflansche bedingte (Abb. 1.11). Nachdem der Electron „Aerolithe“- Prototyp auf dem Paris Autosalon im Herbst 1935 debütierte – eine automobiler Sensation, die insgesamt nur in drei Exemplaren gebaut wurde – wählte man danach das leichter zu handhabende Aluminium, behielt aber den auffälligen optischen Effekt bei. Das nicht unwichtig zu erwähnende Fahrzeuggewicht betrug 953 kg.

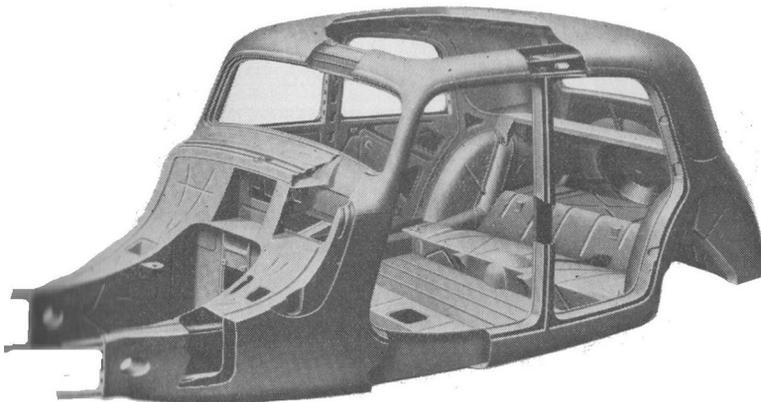


Abb. 1.10 Citroën Traction Avant, Serienfertigung in selbsttragender Bauweise, aus [4]

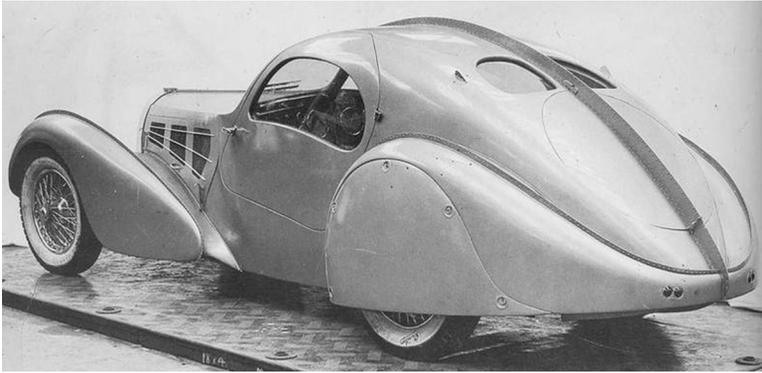


Abb. 1.11 Bugatti „Aerolithe“, aus [4]

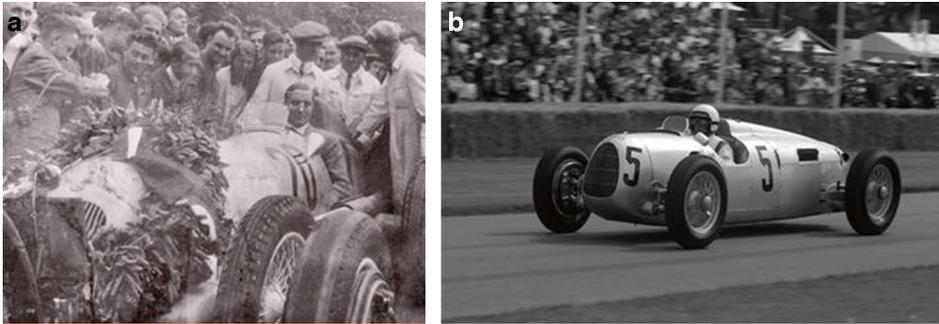


Abb. 1.12 (a) Manfred von Brauchitsch auf Mercedes-Benz W25 750-kg-Wagen in 1934, (b) Auto-Union-Typ „C“ mit einer „Mittelmotor-Bauweise“, beide aus [4]

1.3.5 Geschwindigkeitsrekorde vor dem Untergang

Bevor der 2. Weltkrieg seinen unheilverkündenden düsteren Vorhang auch über die Bühne der Automobilerfolge senkte, darf noch einmal an große Triumphe erinnert werden: die Silberpfeile von Mercedes und von Auto Union. 1934 hatte Manfred von Brauchitsch auf dem Nürburgring den ersten Sieg für Mercedes eingefahren (Abb. 1.12a). Ob wahr oder erfunden, so ist die berühmte Geschichte über die Mutation der Rennwagen zu Silberpfeilen für den Leichtbau doch sehr anschaulich: Angeblich habe der „W25“ (das Auto hatte einen 354 PS starken, 8-Zylinder-Motor und 3,4 l Hubraum) mit 751 kg für das Reglement ein Kilo zu viel gewogen (laut dem Grand Prix Reglement von 1934 durften die Fahrzeuge trocken und ohne Räder und Reifen nicht mehr als 750 kg wiegen). Kurzum habe man im Team von Rennleiter Alfred Neubauer über Nacht den Lack abgeschliffen und die zulässige Gewichtsgrenze soweit eingehalten. Silber wurde damit die Farbe der Sieger!

Die P-Rennwagen der Auto Union – das Kürzel repräsentiert den Namen des Konstrukteurs Ferdinand Porsche – bestimmten den Verlauf der internationalen Rennen bis 1939:

Die spannenden Duelle von Bernd Rosemeyer mit dem Mercedes-Fahrer Rudolf Caracciola zählten im Genre der 1930er-Jahre zu den Höhepunkten des Rennsports. Hans Stuck, Ernst v. Delius und Tazio Nuvolari waren bei vielen Grand-Prix-Rennen Sieger mit dem ersten Mittelmotor-Rennwagen aus Zwickau.

Mercedes hatte in Württemberg mit der Fahrzeugkonstruktion von Hans Nibel ein vollkommen anderes Konzept für die 750-kg-Rennformel entwickelt als Auto Union in Sachsen. Das Unternehmen war 1932 durch den Zusammenschluss von Audi, DKW Horch und Wanderer entstanden. Bei Auto Union hatte man den Motor vor der Hinterachse angeordnet (Abb. 1.12b). Beiden gemeinsam war jedoch ein konsequent realisierter Leichtbau mit aus-härtbaren Aluminiumlegierungen (Sie werden uns im Kap. 3 dieses Buches bei Potenzialen relevanter Werkstoffe wieder begegnen). Die gesamte Al-Karosserie des Auto-Union-Typs „C“ (520 PS bei 6 l Hubraum leistet der 16-Zylinder in seiner dritten Ausbaustufe) wog nur 45 kg. Die Rennaktivitäten beider Firmen wurden übrigens vom Reichsverkehrsministerium mit Zuwendungen von mehreren 100.000 Reichsmark bezuschusst. 1937 errang die Auto Union mit dem Silberpfeil Typ „C“ auf der Autobahn bei Frankfurt mehrere Welt- und Klassenrekorde. Rosemeyer bezwang erstmals die 400 km/h Marke auf einer Autostraße. Am 28. Januar 1938 erreichte Caracciola mit einem Mercedes „W125“ auf dem Abschnitt Frankfurt nach Darmstadt die Geschwindigkeit von 432 km/h. Kurz darauf verunglückte Rosemeyer tödlich, nachdem er von einer Windböe erfasst wurde. Die NS-Machthaber bemächtigten sich seines Ruhmes für eine pompöse Propaganda.

1.3.6 Wirtschaftswunder

In den Nachkriegsjahren wurden weltweit zunächst unterschiedliche Strömungen in der Automobiltechnik verfolgt. Nordamerika setzte die Erfolge der Massenproduktion von PKW fort, man konzentrierte sich weiter auf die Erfordernisse einer kostengünstigen und rationalisierten Großserienproduktion. Aufgrund der niedrigen Kraftstoffpreise und des fast unbegrenzt erscheinenden Verkehrsraums erreichten die amerikanischen Fahrzeugkonzepte bemerkenswerte Dimensionen und Komfortstufen, entbehrten aber weitgehend innovativer Merkmale zu Diversifizierung in kleinere Modelle oder gar zu höherer Energieeffizienz.

Ganz anders in Japan und Europa, wo die wirtschaftlichen Lasten des Weltkrieges vorher vorhanden gewesene Expertisen und Trends jetzt geradezu katalysierten. Überall entstanden dort Klein- bzw. Kompaktwagen, die auf preiswerte Anschaffung und kostengünstigen Betrieb der sich von niedrigem Niveau aus auf schnell regenerierende Märkte zielte. Typische Vertreter waren z. B. der Citroën 2CV in Frankreich oder der Fiat 500/600 in Italien, in der BRD gab es den Lloyd 300 mit 10 PS leistendem Zweitaktmotor – die Karosserie aus Holz war mit Kunstleder bezogen – und die DDR startete 1957 in Zwickau den Trabant [12]. Letzterer verwendete Baumwolle, eigentlich Baumwollreste und Produktionsabfälle, mit Phenolharz gebunden als Karosserieblechersatz.

Kleinheit und einfache, robuste Fahrzeugarchitekturen bedeuten konzeptbedingt auch Leichtigkeit. Die Fahrzeuge der „1000-cm³-Hubraumklasse“ wogen eben damals auch nur 600 bis 800 kg.

Hierzu muss allerdings angeführt werden, dass die Sicherheitsanforderungen bis in die 1960er-Jahre noch deutlich geringer ausfielen als dies heute gilt. Erst nach und nach begannen in den USA durch Verbraucherbewegungen und dann in Europa, Japan und weiteren Ländern entsprechende Rahmenverordnungen und Testprozeduren zur Automobilsicherheit zu greifen.

Der einsetzende Siegeszug der frontangetriebenen Klein- und Mittelklasseautos begünstigte zudem die Gewichtsbilanz. Die kompakte Bauweise und der Wegfall von Bauteilen im Antrieb ermöglichte Gewichtsvorteile bis zu 5 % gegenüber der Standardbauweise.

1.3.7 Die Silberfeile kommen zurück

Bereits 1952 baute Mercedes wieder Rennwagen. Der 300 SL (W 194), errang überraschende Siege, z. B. bei der „Carrera Panamericana“ oder dem „24-Stunden-Rennen“ von Le Mans. Die extrem verwindungssteife Karosserie stammt von Rudolf Uhlenhaut, damals Leiter des Versuchs. „Ein Rahmen soll keine Federkräfte aufnehmen“ dekretierte Uhlenhaut, dafür seien schließlich die Federn da [14]. So entstand ein dreidimensionales Rohrgerüst aus dünnen Stahlrohren, welches nur ca. 50 kg wog. Von zwei Querträgern abgesehen, wurde keines der hochfesten Rohre auf Biegung beansprucht, es sind ausschließlich Zug- und Druckkräfte, die im Fachwerkvolumen wirken. Das ganze Auto wog nur 1310 kg.

Konzeptbedingt erhielt der SL hohe Seitenschweller, um genügend Steifigkeit zu ermöglichen, andererseits wäre er zu weich ausgefallen. Die filigrane Rohrrahmenstruktur bedingte somit den Einstieg von oben mit den Klappen, den späteren Klassikermerkmalen des 300-SL-Flügeltürsers.

Für das Formel-1-Reglement für 1954/55 entwickelte Mercedes den „W 196“. Anstelle von freistehenden Rädern erhielt der „W 196“ eine Vollverkleidung wie sie bei den AVUS-Rekordfahrten vor dem Krieg üblich war. Die Bleche der Karosserie bestanden aus Magnesium und Aluminium und wurden anfangs von Hand über Holzblöcke geformt, später in Metallformen fabriziert. Der „W 196“ brachte in der Stromlinienausführung ca. 800 kg auf die Waage (Abb. 1.13), als Monoposto ca. 650 kg.

Für die Sportwagen-Weltmeisterschaft leitete Mercedes die Variante eines offenen Zweisitzers ab, den 300 SLR. Sein Gitterrohrrahmen entsprach im Wesentlichen dem Formel-1-Wagen und der 300 SLR brachte im Jahre 1955 mit 8-Zylinder-Otto-Reihenmotor und einer Leistung von 288 kW (310 PS) ein Trockengewicht von bemerkenswerten 860 kg auf die Waage. Zylinderblöcke und Zylinderköpfe waren integral aus AlSi11-Legierung (Silumin) gegossen.

Für die Karosserie verwendete man Magnesium. Der Gitterrohrrahmen, das filigrane Fachwerk aus Rohren mit teilweise nur 1 mm Wandstärke (Abb. 1.14), wog lediglich 60 kg. Der erste Triumph für den 300 SLR war die Mille Miglia, die Stirling Moss 1955 gewann. Im gleichen Jahr siegte auf dem Nürburgring Juan Manuel Fangio vor Moss.

Die Treiberrolle Werkstoffleichtbau führte gewissermaßen in direkter Linie vom 300 SLR zum Mercedes-SLR-McLaren, einem Supersportwagen, der von 2004 bis 2009 in

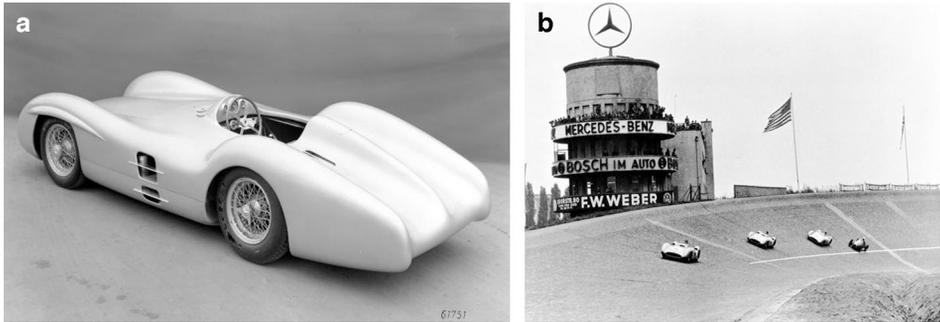


Abb. 1.13 (a) Mercedes-Benz Formel-1-Rennwagen W 196 R mit Stromlinienkarosserie, 1954 (links); (b) Fahren und Siegen: 1954 lagen beim AVUS-Rennen drei 300 SL vorn, hier in der berühmtesten Steilkurve, Fangio fährt zudem die schnellste Rennrunde (rechts), beide aus [4]

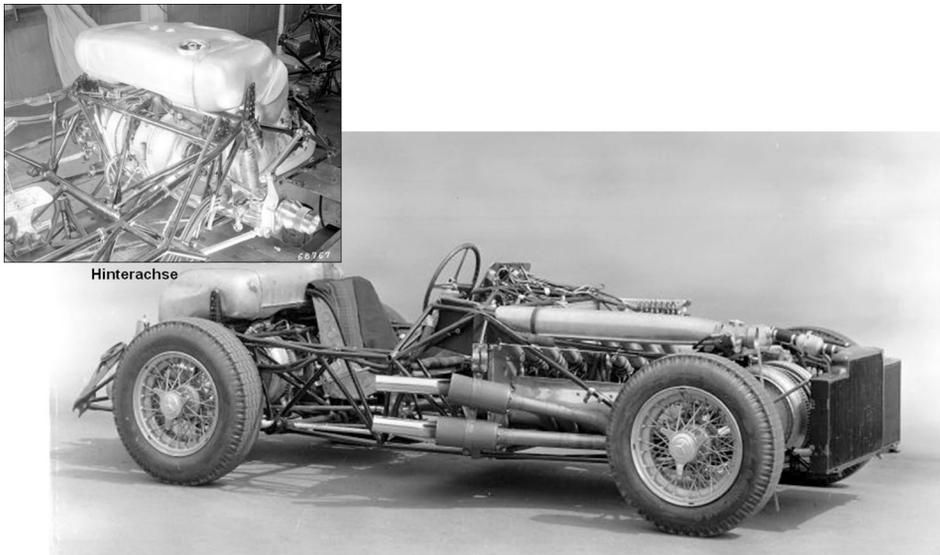


Abb. 1.14 Fahrgestell des Mercedes Typ 300 SLR (W 196 S), aus [4]

England produziert wurde. Der aufgeladene V8-Motor lieferte dabei 460 kW (626 PS) aus 5,4 l Hubraum für ein Fahrzeug mit dem Leergewicht von 1768 kg. Die Karosserie besteht aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) in Anlehnung an Formel-1-Architekturen. Der Vorderwagen bzw. Motorträger wird auch aus Gründen der Temperaturbelastung aus Aluminium hergestellt. Interessant ist auch die Ausführung der Frontcrashbox mit wiederum aus CFK-hergestellten, teilweise geflochtenen Kunststoffverbundbauteilen (vergl. Kap. 4 dieses Buches zu technischen Randbedingungen im Leichtbau). Die Vorteile von CFK bei Crashstrukturen sind schließlich die hohe gewichtsspezifische Energieabsorption, der damit verbundene deutliche Gewichtsvorteil gegenüber einem metallischen Bauteil und das sehr gleichmäßige Energieaufnahme- bzw. Versagensverhalten im Unfall (Abb. 1.15).



Abb. 1.15 Mercedes-McLaren-Struktur, aus [4]

1.3.8 Erfolge für die Serie

Wer bei Triumph nur an den Rennsport denkt, greift erheblich zu kurz: immer schon wurden Leichtbauansätze unter schwierigsten Rennbedingungen zwar dort bewiesen, dann aber schrittweise in die Volumenproduktion transferiert. Vor allem seit Ende des 20. Jahrhunderts gehörten konsequente Massereduzierungen zu den wichtigsten Stellhebeln der Automobilingenieure, um Serienautos sparsamer und kraftstoffeffizienter, damit auch hinsichtlich der Emissionen und insbesondere der CO₂-Emissionen günstiger zu gestalten.

Mercedes hat, beginnend in den 70er-Jahren des vorigen Jahrhunderts, in der damaligen SL-Serie teilweise Aluminiumbleche eingesetzt. Bei der Marke Audi ist Leichtbau mit Aluminium ein strategischer Beitrag zur technischen Markenidentität geworden. Bereits auf der Hannover Messe 1985 stand ein Audi 100 mit einer Aluminiumkarosserie, allerdings in Schalenbauweise, wie sie auch heute noch für Stahlkarosserien in Großserienfertigungen dominiert. Die Entwicklungsarbeiten mündeten 1993 jedoch in die produktionsreife Spaceframe-Bauweise mit Aluminium, bei Audi ASF genannt (Audi-Spaceframe). Das Konzept einer selbsttragenden Aluminiumkarosserie verlangt ein Gerüst aus Aluminium-Strangpressprofilen und – druckgussteilen in den Knoten. Aluminiumbleche bilden z. B. Boden und Außenhaut und sind, was in diesem Zusammenhang konzeptbestimmend ist, auch kraftschlüssig bzw. lasttragend integriert. Der Audi A8 wurde somit wohl zum ersten Serienauto, das mit dem Werkstoff Aluminium ein individuelles Konstruktionsprinzip verwirklichte. Der Hersteller gab gegenüber einer reinen Stahlbauweise ca. 40 % Gewichtsreduzierung an. Für die erste Generation des A8 wog der Aufbau 245 kg. Mit einem ASF-Konzept und entsprechend 115 kg gelang auch für den A2 (1,2 TDI) das Erreichen des Verbrauchsziels 3 l/100 km [15].

Heute und im A8 der fünften Generation sind große komplexe Gussbauteile verwendet, sie kommen vor allem dort vor, wo große Gestaltungsfreiheit gefordert ist, in Einzelfällen nach bionischen Prinzipien topologieoptimiert. Es finden sich aber inzwischen auch höchstfeste Warmformstähle aufgrund deren großer Festigkeit und Steifigkeit in der Fahrzeugseite, z. B. bei der B-Säule, gewichtsoptimiert gegenüber Al gebaut werden kann. Die