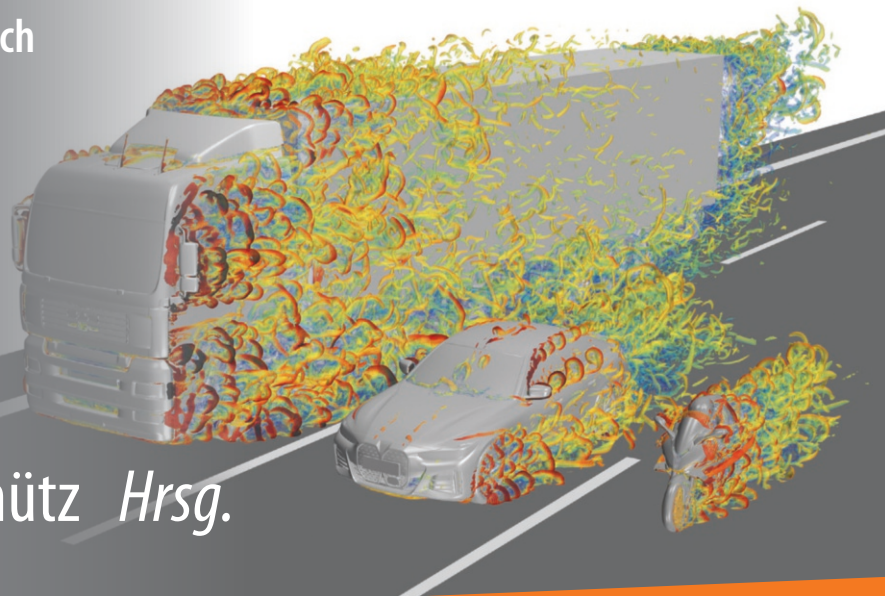


ATZ/MTZ-Fachbuch



Thomas Schütz *Hrsg.*

# Hucho – Aerodynamik des Automobils

Strömungsmechanik,  
Fahrdynamik, Thermomanagement,  
Akustik, Entwicklungswerkzeuge

*7. Auflage*

 Springer Vieweg

---

# ATZ/MTZ-Fachbuch

# FKFS – Research in Motion.

Das FKFS ist ein hochentwickelter Ingenieurdienstleister der internationalen Automobilindustrie und eine unabhängige Forschungseinrichtung zugleich.

Als innovativer Partner bieten wir unseren Kunden ein weites Spektrum von der Beantwortung verschiedenster Fragestellungen bis hin zu hochspezialisierten Sonderlösungen. Hierbei profitieren wir von unseren zahlreichen Prüfständen, unseren Mess-, Prüf- und Simulationsverfahren und unseren kompetenten Beschäftigten mit exzellentem Know-how. Mit einer herausragenden Infrastruktur und einer hohen Interdisziplinarität sind wir bestens gerüstet für die Herausforderungen der zukünftigen Mobilität.

---

Thomas Schütz  
Hrsg.

# Hucho – Aerodynamik des Automobils

Strömungsmechanik, Fahrdynamik,  
Thermomanagement, Akustik,  
Entwicklungswerkzeuge

7. Auflage

*Hrsg.*  
Thomas Schütz  
Motorrad Werksprojekte  
BMW AG  
Berlin, Deutschland

ISSN 2628-104X  
ATZ/MTZ-Fachbuch  
ISBN 978-3-658-35832-7  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-35833-4>

ISSN 2628-1058 (electronic)  
ISBN 978-3-658-35833-4 (eBook)

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2005, 2013, 2023

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 jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber 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: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

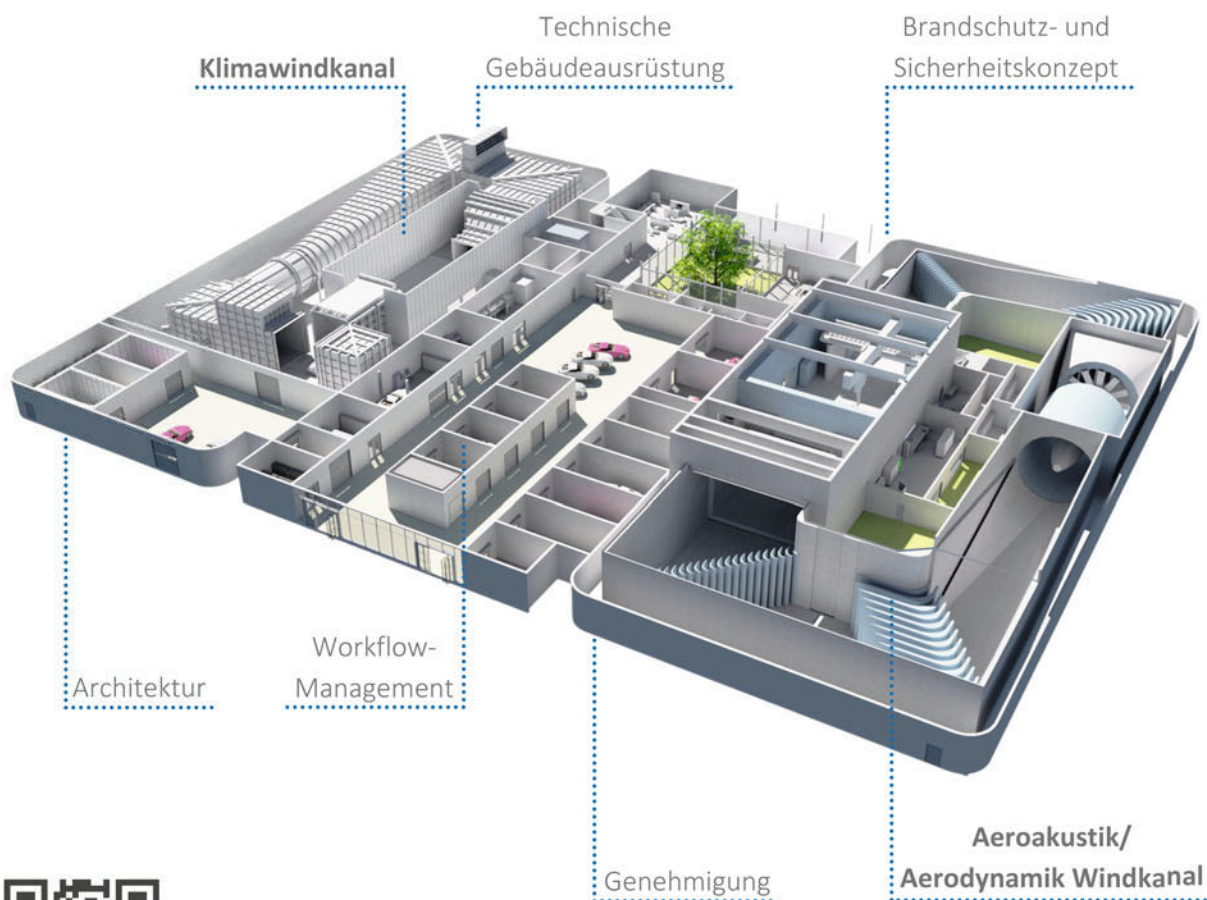
*In Gedenken an Dipl.-Volksw. Walter Karl Schütz  
(1927–2021)*

*„There is only one thing in the long run more expensive than education: no education.“*

*(John F. Kennedy)*

# Ganzheitliche Planung innovativer Windkanäle

Aerodynamik – Aeroakustik – Thermodynamik



## Lösungen für eine nachhaltige Zukunft schaffen

Planung und Realisierung innovativer Windkanaltechnik für Forschung und Entwicklung.

Wir begleiten unsere Kunden durch alle Projektphasen: vom Konzept über die Entwurfs- und Detailplanung, Ausschreibung und Vergabe sowie Bauüberwachung bis zur Inbetriebnahme und Endabnahme.

Von der ersten Idee bis zum perfekten Ergebnis.



**Wallner und Brand**  
Ingenieurgesellschaft mbH



---

## Vorwort

Die aerodynamischen Eigenschaften neuer Fahrzeuge gewinnen immer mehr an Bedeutung, denn mit der Aerodynamik werden wesentliche Eigenschaften eines Automobils festgelegt. Dabei steht der Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch in Zeiten von Rohstoffverknappung und dem Streben nach konkurrenzfähigen elektrifizierten Antriebssträngen im Vordergrund. Steigende Kraftstoffpreise, immer strengere Emissionsgesetze und nicht zuletzt die hoch gesteckten e-Reichweiten- und Verbrauchsziele der Automobilindustrie haben bewirkt, dass diese seit langem bekannten Zusammenhänge nunmehr vorbehaltlos Anerkennung finden.

Doch geht es keineswegs nur um die hierfür notwendige Reduzierung des Luftwiderstands, wenngleich man sich dieser Aufgabe, wie auch hier, stets als Erstes zuwendet. Neben Emissionen und Reichweite ist der Luftwiderstand ebenso maßgeblich für die Fahrleistungen wie beispielsweise die Spitzengeschwindigkeit.

Aber der Luftwiderstand, repräsentiert durch den  $c_w$ -Wert, ist nicht alles. Die übrigen Zielgrößen der Fahrzeugaerodynamik sind für die Funktion eines Automobils nicht weniger bedeutsam: Auftriebsverteilung und Seitenwindstabilität beeinflussen die Fahreigenschaften, insbesondere die Querdynamik des Autos. Windgeräusche, Verschmutzung der Karosserie sowie Kühlung von Motor, Getriebe und Bremsen hängen von der Umströmung und der Durchströmung des Fahrzeugs ab.

Sieht man einmal von den Rennwagen ab, dann wird die Form eines Autos nicht dadurch bestimmt, dass mit ihr gewünschte aerodynamische Eigenschaften verwirklicht werden sollen, wie das zum Beispiel bei einem Flugzeug der Fall ist, das darauf ausgelegt wird, einen vorgegebenen Auftrieb zu erzeugen. Im Gegenteil, die Form eines Autos wird unter funktionellen, ökonomischen und vor allem nach ästhetischen Gesichtspunkten entwickelt. Dem Design kommt dabei eine überragende Bedeutung zu. Mit ihm werden technische Anforderungen in ein Erscheinungsbild umgesetzt, das in die Zeit passt, das mit der Mode im Einklang ist. Zur Natur der Mode gehört jedoch der Wandel und folglich muss auch das Design ständig nach neuen Ausdrucksformen suchen. Für die Aerodynamik des Automobils bedeutet das zweierlei:

- die aerodynamischen Eigenschaften eines Autos ergeben sich in der Regel als Konsequenz seiner Form, nicht als deren Begründung;
- das Ziel kann nicht die eine, ultimative Form sein, wie sie z. B. von einem Verkehrsflugzeug verkörpert wird. Die Aerodynamik hat sich mit immer neuen Formen auseinanderzusetzen, jedoch wirkt sie dabei aber durchaus auf das Design zurück.

In der Terminologie der Aerodynamik ist das Auto ein „stumpfer Körper“, weil seine Umströmung von Ablösungen geprägt ist. Und anders als bei Flugzeugen und Turbomaschinen, eher ähnlich wie bei Schiffen, lässt sich sein Strömungsfeld nicht in einzelne, nur wenig voneinander abhängende Gebiete zergliedern, die zumindest in einem ersten Schritt jedes für sich allein optimiert werden können. Immer muss der Körper als Ganzes behandelt werden. Und gerade das erschwert die systematische Durchdringung der Fahrzeugaerodynamik ganz außerordentlich. Der Fahrzeugaerodynamiker bleibt bei der Lösung seiner Aufgaben auf ein empirisches Vorgehen angewiesen, gleichwohl ob er sich dabei des Windkanals, der numerischen Strömungsmechanik oder eines Wechselspiels zwischen beiden bedient. Um den Weg zu einer systematischen Empirie zu ebnen, werden in diesem Buch drei Schwerpunkte gebildet:

- Es werden die physikalischen Grundlagen der Fahrzeugaerodynamik entwickelt;
- aus der schier unüberschaubaren Fülle zumeist produktbezogener Versuchsergebnisse werden, soweit irgend möglich, allgemeingültige strömungsmechanische Zusammenhänge abgeleitet,
- und schließlich werden Strategien beschrieben, nach denen sich diese einzelnen Ergebnisse sinnvoll zu einem Ganzen zusammensetzen lassen.

Wie in den vorangegangenen Auflagen wird die Aerodynamik von Personenwagen und Nutzfahrzeugen, von Rekord-, Sport- und Rennautos sowie von Motorrädern in allen ihren Teilaspekten dargestellt. Dazu kommt der Schutzhelm, dessen Aerodynamik auf den gleichen Aufgabenstellungen beruht, die auch beim Gesamtfahrzeug gegeben sind, nur auf engstem Raum. Neben der Umströmung wird auch die Durchströmung des Fahrzeugs beschrieben, wobei es im Wesentlichen um die Kühlung der Aggregate geht. Wegen der engen Kopplung von Um- und Durchströmung ist deren simultane Betrachtung geboten und zudem werden beide ohnehin mit der gleichen Methodik bearbeitet, im Windkanal ebenso, wie auf dem Rechner. Die Darstellung beschränkt sich aber nicht auf die Aerodynamik im engeren Sinne. Vielmehr werden die angrenzenden Gebiete mit einbezogen, auf die sie Einfluss nimmt oder denen sie dient.

Trotz großer Fortschritte in der numerischen Aerodynamik bleibt die experimentelle Erarbeitung von Entwicklungsfortschritten im Windkanalversuch ein nicht ersetzbarer Bestandteil der Arbeit des Aerodynamikers. Diese wird ausführlich abgehandelt. In ihrem Mittelpunkt steht der Windkanal. Dessen Eigenschaften müssen im Zusammenhang

mit seinen Simulationsdefiziten gesehen werden. Nur wenn diese quantifiziert werden können, sind die in ihnen erarbeiteten Versuchsergebnisse richtig zu bewerten. Ebenfalls vorgestellt wird die Messtechnik, die sich um das große Versuchsspektrum herum entwickelt hat.

Eingehend wird die numerische Aerodynamik behandelt, auch wenn ihr ebenfalls noch Defizite anhaften. Die Fortschritte, die in jüngster Zeit nicht zuletzt auch aufgrund immer weiter steigender Rechnerressourcen und hochgenauer physikalischer Modelle erzielt wurden, haben dazu geführt, dass numerische Verfahren (CFD) mittlerweile auf Augenhöhe zum Windkanalversuch stehen. Der Aerodynamiker hat heute die Wahl, welches Entwicklungswerkzeug er von den beiden genannten verwendet, um den Lösungsraum zu erschließen, der ihn gerade in diesem Moment interessiert.

Das vorliegende Buch wendet sich an Automobilingenieure in der Industrie, in Forschung und Lehre, in den Technischen Überwachungsvereinen und Behörden und nicht zuletzt an Studenten. Fahrzeugtechniker, also Konstrukteure, Versuchs- und Berechnungsingenieure, sollen ebenso angesprochen werden wie Aerodynamiker, die aus anderen Branchen kommen. Es richtet sich aber auch an Designer und an Fachjournalisten sowie an von der Technik begeisterte Automobilisten.

Die einzelnen Kapitel sind so angelegt, dass jedes für sich allein verständlich ist. Vertiefte Kenntnisse der Aerodynamik werden nicht vorausgesetzt. Die relevanten Grundlagen werden in einem gesonderten Kapitel zu Beginn des Buchs aufbereitet. Wenn es an der einen oder anderen Stelle zu Überschneidungen kommt, so ist das kein Nachteil. Die Redundanz dient vielmehr der Verknüpfung der einzelnen Sachgebiete, auch der Wiederholung und der Vertiefung.

Bei der Auswahl der Literaturhinweise ging es nicht um bedingungslose Vollständigkeit – dies ist Sache einer Datenbank – sondern vielmehr darum, die wesentlichen Arbeiten zu zitieren, mit denen der Leser in der Lage ist, die angesprochenen Probleme zu vertiefen. Das vorliegende Werk ist mit einem übergreifenden und durchnummerierten Literaturverzeichnis ausgestattet, das eine sehr schnelle und effiziente Recherche ermöglicht. Besondere Sorgfalt wurde auf die einheitliche Nomenklatur gelegt: Formelzeichen und sonstige Bezeichnungen wurden über alle Kapitel hinweg bis auf wenige Ausnahmen vereinheitlicht.

Den Grundstein zu diesem Buch legten der ehemalige Herausgeber Dr. Wolf-Heinrich Hucho und einige der Mitautoren mit einem Lehrgang, den sie auf Anregung von Herrn Dr. Heinrich Hahn 1978 im Haus der Technik in Essen veranstalteten. Die erste Auflage erschien 1981 und wurde später ins Russische und Polnische übersetzt. Danach ist das Buch laufend erneuert und erweitert worden. Im Wechsel zwischen Englisch – „Aerodynamics of Road Vehicles“ – und Deutsch – „Aerodynamik des Automobils“ – folgten weitere Auflagen. Die hier vorliegende siebte, deutschsprachige Ausgabe, entstand unter der Regie eines neuen Herausgebers und bietet gegenüber der sechsten eine umfassende Überarbeitung, die nicht zuletzt durch die Fortschritte in der numerischen Aerodynamik und der Windkanaltechnik, aber auch der regulatorischen Gegebenheiten erforderlich wurde. Hierauf aufbauend sind die Fahrzeugaerodynamiker in Entwicklung und Forschung

mehr denn je in der Lage, die strömungsmechanischen Vorgänge rund um das Automobil realitätsgetreu zu modellieren, zu analysieren und zu verstehen.

Als Herausgeber danke ich Herrn Dr.-Ing. Wolf-Heinrich Hucho außerordentlich für das Vertrauen, seine über Jahrzehnte zu einem bekannten und geachteten Standardwerk gereifte Schrift in meine Hände zu übergeben und die damit verbundene Chance, die bislang geleistete Arbeit fortzuführen. Ferner profitiert auch diese Auflage von der enormen Erfahrung Dr. Huchos, die sich im historischen Überblick des ersten Kapitels widerspiegelt. Mein Dank gilt ebenso allen Autoren, sowie den Fachkollegen bei der BMW AG im Aerodynamischen Versuchszentrum München (AVZ) unter Leitung von Herrn Sven Klussmann und an der Technischen Universität Darmstadt rund um Frau Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong und die Herren Prof. i. R. Dr.-Ing. habil. Cameron Tropea, Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Suad Jakirlic und Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Ilia Roisman für den regen fachlichen und gewinnbringenden Austausch. Und schließlich danke ich meiner Mutter Sabine, dass ich in der Lage bin, ein solches Buchprojekt zu führen, meinem Mann Sebastian für seine Liebe und sein Verständnis für unzählige arbeitsreiche Abende, sowie meinen Freunden Michael, Thomas und Matthias: Gut zu wissen, dass ihr für mich da seid!

Berlin, Deutschland  
Sommer 2021

Thomas Schütz

---

# Inhaltsverzeichnis

## Band 1

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b> . . . . .                         | <b>1</b> |
|          | Wolf-Heinrich Hucho und Thomas Schütz               |          |
| 1.1      | Aufgabenspektrum . . . . .                          | 1        |
| 1.1.1    | Zielgrößen . . . . .                                | 1        |
| 1.1.2    | Charakterisierung der Fahrzeugaerodynamik . . . . . | 2        |
| 1.1.3    | Angrenzende Fachgebiete . . . . .                   | 7        |
| 1.2      | Entwicklung der Fahrzeugaerodynamik . . . . .       | 9        |
| 1.2.1    | Der Zeit voraus . . . . .                           | 9        |
| 1.2.2    | Leitgröße $c_w$ . . . . .                           | 9        |
| 1.2.3    | Rekonstruktion anhand der Literatur . . . . .       | 12       |
| 1.2.4    | „Entliehene“ Formen . . . . .                       | 12       |
| 1.2.5    | Die Stromlinie . . . . .                            | 17       |
| 1.2.6    | Erste Parameterstudien . . . . .                    | 28       |
| 1.3      | Von der Kutsche zum Automobil . . . . .             | 29       |
| 1.3.1    | Tiefziehen . . . . .                                | 29       |
| 1.3.2    | Ponton-Karosserie . . . . .                         | 31       |
| 1.3.3    | Einvolumen-Körper . . . . .                         | 35       |
| 1.4      | Strategien für die Entwicklung . . . . .            | 39       |
| 1.4.1    | Detailoptimierung . . . . .                         | 39       |
| 1.4.2    | Formoptimierung . . . . .                           | 44       |
| 1.4.3    | Grenzwert . . . . .                                 | 50       |
| 1.5      | Erscheinungsbild . . . . .                          | 53       |
| 1.5.1    | Vorderwagen . . . . .                               | 53       |
| 1.5.2    | Heckformen . . . . .                                | 53       |
| 1.5.3    | Kamm-Heck . . . . .                                 | 53       |
| 1.5.4    | Schrägheck . . . . .                                | 58       |
| 1.5.5    | Stufenheck . . . . .                                | 59       |
| 1.5.6    | Vollheck und Sportback . . . . .                    | 59       |
| 1.6      | Richtungsstabilität . . . . .                       | 59       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 1.7      | Nutzfahrzeuge . . . . .                                   | 63         |
| 1.8      | Motorräder und Schutzhelme . . . . .                      | 67         |
| 1.9      | Innere Strömungen . . . . .                               | 68         |
| 1.9.1    | Motorraum . . . . .                                       | 68         |
| 1.9.2    | Fahrgastraum . . . . .                                    | 70         |
| 1.10     | Symbiose von Design und Aerodynamik . . . . .             | 71         |
| 1.11     | Werkzeuge für die Entwicklung . . . . .                   | 75         |
| 1.11.1   | Windkanäle . . . . .                                      | 75         |
| 1.11.2   | Rating . . . . .  | 75         |
| 1.11.3   | Numerische Berechnung – Klassischer Weg . . . . .         | 76         |
| 1.11.4   | Numerische Berechnung – Ganzheitliche Verfahren . . . . . | 78         |
| <b>2</b> | <b>Physikalische Grundlagen der Aerodynamik . . . . .</b> | <b>83</b>  |
|          | Andreas Dillmann  |            |
| 2.1      | Grundgleichungen der Strömungsmechanik . . . . .          | 83         |
| 2.1.1    | Erhaltungssätze . . . . .                                 | 83         |
| 2.1.2    | Kinematik und Dynamik von Strömungsfeldern . . . . .      | 84         |
| 2.1.3    | Die Kontinuitätsgleichung . . . . .                       | 90         |
| 2.1.4    | Die Euler-Gleichung . . . . .                             | 92         |
| 2.1.5    | Die Bernoulli-Gleichung . . . . .                         | 93         |
| 2.1.6    | Potenzialtheorie . . . . .                                | 95         |
| 2.1.7    | Die Navier-Stokes-Gleichung . . . . .                     | 96         |
| 2.1.8    | Integralformen der Erhaltungssätze . . . . .              | 99         |
| 2.2      | Dynamik der reibungsfreien Strömung . . . . .             | 105        |
| 2.2.1    | Zur Interpretation von Stromlinienbildern . . . . .       | 105        |
| 2.2.2    | Ebene Modellströmungen . . . . .                          | 106        |
| 2.2.3    | Wirbelströmungen . . . . .                                | 119        |
| 2.3      | Dynamik der reibungsbehafteten Strömung . . . . .         | 124        |
| 2.3.1    | Die Reynolds-Zahl . . . . .                               | 124        |
| 2.3.2    | Das Prandtlsche Grenzschichtkonzept . . . . .             | 126        |
| 2.3.3    | Grenzschichtablösung . . . . .                            | 130        |
| 2.3.4    | Grenzschichtturbulenz . . . . .                           | 133        |
| 2.3.5    | Widerstand einfacher Körper . . . . .                     | 138        |
| 2.3.6    | Mehrkörpersysteme . . . . .                               | 147        |
| 2.3.7    | Durchströmte Leitungssysteme . . . . .                    | 150        |
| 2.4      | Anhang . . . . .  | 164        |
| 2.4.1    | Dichte und Viskosität von Luft . . . . .                  | 164        |
| 2.4.2    | Kompressibilitätseinflüsse . . . . .                      | 164        |
| <b>3</b> | <b>Reichweite, Verbrauch und Fahrleistungen . . . . .</b> | <b>169</b> |
|          | Teddy Woll  |            |
| 3.1      | Stellenwert des Luftwiderstands . . . . .                 | 169        |
| 3.2      | Theorie der Fahrwiderstände . . . . .                     | 172        |
| 3.2.1    | Rollwiderstand . . . . .                                  | 172        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.2.2    | Luftwiderstand . . . . .  | 174        |
| 3.2.3    | Hangabtriebskräfte . . . . .  | 175        |
| 3.2.4    | Beschleunigungskräfte . . . . .   | 177        |
| 3.2.5    | Gesamt-Fahrwiderstand . . . . .   | 177        |
| 3.2.6    | Beispiel zu den verschiedenen Fahrwiderständen . . . . .                    | 178        |
| 3.3      | Reichweite von Elektrofahrzeugen . . . . .                                  | 179        |
| 3.3.1    | Einflussfaktoren der Reichweite . . . . .                                   | 179        |
| 3.3.2    | Möglichkeiten zur Reichweitensteigerung . . . . .                           | 180        |
| 3.3.3    | Verbrauch von Elektrofahrzeugen – ab Batterie und<br>ab Steckdose . . . . . | 183        |
| 3.4      | CO <sub>2</sub> -Emissionen und Verbrauch . . . . .                         | 184        |
| 3.4.1    | Verbrauchsberechnung . . . . .  | 184        |
| 3.4.2    | Verbrauchsmessung, Abgasgesetze und CO <sub>2</sub> -Äquivalente . . . . .  | 186        |
| 3.5      | Fahrleistungen . . . . .  | 189        |
| 3.5.1    | Beschleunigung und Elastizität . . . . .                                    | 189        |
| 3.5.2    | Steigfähigkeit . . . . .  | 190        |
| 3.5.3    | Höchstgeschwindigkeit . . . . .   | 190        |
| 3.6      | Fahrzyklen . . . . .  | 192        |
| 3.6.1    | Historie der Fahrzyklen . . . . .   | 192        |
| 3.6.2    | WLTP – Worldwide harmonized Light vehicles Test<br>Procedure . . . . .      | 194        |
| 3.6.3    | US-Amerikanische Zyklen . . . . .   | 195        |
| 3.6.4    | Asiatische Zyklen . . . . .   | 196        |
| 3.6.5    | Reale Zyklen und Verbrauchüberwachung OBFCM . . . . .                       | 198        |
| 3.7      | Flottenverbrauch und CO <sub>2</sub> -Gesetzgebung . . . . .                | 199        |
| 3.7.1    | Gesetze in der EU . . . . .   | 199        |
| 3.7.2    | Gesetze in USA . . . . .  | 200        |
| <b>4</b> | <b>Aerodynamische Kräfte und Momente an Straßenfahrzeugen . . . . .</b>     | <b>201</b> |
|          | Thomas Schütz   |            |
| 4.1      | Luftkräfte und deren Beiwerte . . . . .                                     | 205        |
| 4.2      | Strömungsphänomene an Pkw . . . . .   | 211        |
| 4.2.1    | Totwasser . . . . .   | 213        |
| 4.2.2    | Längswirbel . . . . .   | 221        |
| 4.2.3    | Durchströmung . . . . .   | 222        |
| 4.2.4    | Umgebungseinflüsse . . . . .  | 224        |
| 4.2.5    | Einfluss der Reynolds-Zahl . . . . .  | 226        |
| 4.3      | Analyse der Anteile am Luftwiderstand . . . . .                             | 227        |
| 4.3.1    | Druck- und Reibungswiderstand . . . . .                                     | 227        |
| 4.3.2    | Micro-Drag . . . . .  | 231        |
| 4.3.3    | Analyse nach Einzelanteilen . . . . .                                       | 233        |
| 4.4      | Übrige Komponenten von Luftkraft und -moment . . . . .                      | 255        |
| 4.4.1    | Auftrieb und Nickmoment . . . . .   | 255        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.4.2    | Seitenkraft und Giermoment . . . . .                                  | 258        |
| 4.4.3    | Rollmoment . . . . .  | 260        |
| 4.5      | Widerstand und Auftrieb von Serienfahrzeugen . . . . .                | 260        |
| 4.5.1    | Wettbewerbsübersicht nach Fahrzeugklassen . . . . .                   | 260        |
| 4.5.2    | Widerstandsfläche $c_W \times A_x$ . . . . .                          | 262        |
| 4.5.3    | Ringvergleich nach EADE . . . . .                                     | 263        |
| 4.5.4    | Einfluss der Fahrzeugkonzepte . . . . .                               | 265        |
| 4.5.5    | Einfluss von Ausstattung und Motorisierung . . . . .                  | 270        |
| 4.5.6    | An der Decke fahren? . . . . .  | 273        |
| 4.6      | Zukünftige Entwicklung . . . . .                                      | 273        |
| 4.7      | Referenzgeometrien . . . . .  | 277        |
| 4.7.1    | Der SAE-Referenzkörper . . . . .                                      | 277        |
| 4.7.2    | Der Ahmed-Körper . . . . .  | 279        |
| 4.7.3    | Der DrivAer-Körper . . . . .  | 279        |
| <b>5</b> | <b>Beeinflussung der aerodynamischen Kräfte und Momente . . . . .</b> | <b>285</b> |
|          | Thomas Schütz und Thomas Eberz  |            |
| 5.1      | Der aerodynamische Entwicklungsprozess . . . . .                      | 288        |
| 5.1.1    | Zieldefinition . . . . .  | 288        |
| 5.1.2    | Projektmeilensteine und Werkzeuge . . . . .                           | 291        |
| 5.1.3    | Beispiele . . . . .   | 296        |
| 5.2      | Einfluss der Grundform . . . . .                                      | 298        |
| 5.2.1    | Fahrzeugfront . . . . .   | 299        |
| 5.2.2    | Greenhouse und Seitenflächen . . . . .                                | 310        |
| 5.2.3    | Fahrzeugheck . . . . .  | 327        |
| 5.2.4    | Systematisierung . . . . .  | 366        |
| 5.3      | Kühlflutteinfluss . . . . .   | 369        |
| 5.3.1    | Einströmverluste . . . . .  | 369        |
| 5.3.2    | Druckverluste bei der Kühler- und<br>Motorraumdurchströmung . . . . . | 371        |
| 5.3.3    | Stoß- und Impulsverluste beim Kühlflutaustritt . . . . .              | 375        |
| 5.3.4    | Wechselwirkung von Kühlflut und Umströmung . . . . .                  | 378        |
| 5.3.5    | Aktive Systeme . . . . .  | 380        |
| 5.4      | Anbauteile . . . . .  | 384        |
| 5.4.1    | Unterbodengruppe . . . . .  | 385        |
| 5.4.2    | Bodenabstand und Fahrzeuglage . . . . .                               | 394        |
| 5.4.3    | Räder und Radhäuser . . . . .   | 398        |
| 5.4.4    | Außenspiegel . . . . .  | 420        |
| 5.4.5    | Sonstige Anbauteile . . . . .   | 422        |
| 5.5      | Interferenz . . . . .   | 425        |
| 5.5.1    | Heckabstimmung . . . . .  | 426        |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.5.2    | Wechselwirkung von sonstigen Fahrzeugkomponenten . . .                        | 427        |
| 5.5.3    | Pkw mit Anhänger . . . . .  | 429        |
| 5.5.4    | Kolonnenfahrt . . . . .   | 437        |
| 5.5.5    | Überholvorgänge . . . . .   | 442        |
| <b>6</b> | <b>Aerodynamik und Fahrstabilität</b> . . . . .                               | <b>449</b> |
|          | David Schröck und Andreas Wagner  |            |
| 6.1      | Instationäre aerodynamische Kräfte und Momente . . . . .                      | 450        |
| 6.1.1    | Überholvorgänge . . . . .   | 450        |
| 6.1.2    | Seitenwind und Einfluss von Verkehr . . . . .                                 | 453        |
| 6.2      | Fahrdynamische Auswirkungen . . . . .   | 493        |
| 6.2.1    | Einspurmodell . . . . .   | 493        |
| 6.2.2    | Auftriebsverhalten . . . . .  | 497        |
| 6.2.3    | Auslegung der aerodynamischen Achsentlastungen . . . . .                      | 508        |
| 6.2.4    | Seitenwindverhalten . . . . .   | 509        |
| <b>7</b> | <b>Funktion, Sicherheit und Komfort</b> . . . . .                             | <b>523</b> |
|          | Michael Ade und Alexander Mößner  |            |
| 7.1      | Bauteilbelastung . . . . .  | 524        |
| 7.1.1    | Bauteillasten und deren Bestimmung . . . . .                                  | 524        |
| 7.1.2    | Türen, Klappen, Außenspiegel, Stoßfänger,<br>Schiebedächer, AIRCAP® . . . . . | 527        |
| 7.1.3    | Scheibenwischer . . . . .   | 530        |
| 7.2      | Komfort bei offenem Fahren . . . . .  | 534        |
| 7.2.1    | Zielsetzung . . . . .   | 534        |
| 7.2.2    | Strömung bei geöffnetem Verdeck . . . . .                                     | 535        |
| 7.2.3    | Windgeräusentstehung bei Cabriolets . . . . .                                 | 536        |
| 7.2.4    | Thermischer Komfort . . . . .   | 536        |
| 7.2.5    | Konstruktive Lösungen – Cabriolets . . . . .                                  | 541        |
| 7.2.6    | Konstruktive Lösungen – Schiebedächer . . . . .                               | 547        |
| 7.3      | Wassermanagement zur Sichtfreihaltung bei Regenfahrten . . . . .              | 549        |
| 7.3.1    | Verschmutzungsquellen und physikalische Grundlagen . . . . .                  | 550        |
| 7.3.2    | Fremdverschmutzung . . . . .  | 557        |
| 7.3.3    | Eigenverschmutzung . . . . .  | 570        |
| 7.3.4    | Numerische Zweiphasensimulation . . . . .                                     | 573        |
| <b>8</b> | <b>Kühlung und Durchströmung</b> . . . . .                                    | <b>585</b> |
|          | Ralf Neuendorf  |            |
| 8.1      | Anforderungen an die Kühlung . . . . .  | 585        |
| 8.1.1    | Repräsentative Betriebszustände . . . . .                                     | 586        |
| 8.1.2    | Komponenten und Systeme . . . . .   | 587        |
| 8.1.3    | Weitere Anforderungen . . . . .   | 593        |
| 8.2      | Kühlsystem . . . . .  | 595        |
| 8.2.1    | Motorkühlkreislauf . . . . .  | 595        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 8.2.2    | Grundlagen der Wärmeübertragung . . . . .   | 597        |
| 8.2.3    | Wärmetauscher Bauarten . . . . .  | 599        |
| 8.2.4    | Wärmetauscher im Fahrzeug . . . . .   | 601        |
| 8.3      | Durchströmung . . . . .   | 606        |
| 8.3.1    | Betriebspunkte . . . . .  | 606        |
| 8.3.2    | Kühlmodul . . . . .   | 608        |
| 8.3.3    | Lüfter . . . . .  | 610        |
| 8.4      | Optimierung des Gesamtsystems . . . . .   | 612        |
| 8.4.1    | Berechnung des Kühlluftmassenstroms . . . . .   | 612        |
| 8.4.2    | Einflussparameter der Durchströmung . . . . .   | 617        |
| 8.4.3    | Lufteintritte und Kühlluftführung . . . . .   | 619        |
| 8.4.4    | Kühlermatrix . . . . .  | 621        |
| 8.4.5    | Lüfter . . . . .  | 624        |
| 8.4.6    | Motorraum . . . . .   | 628        |
| 8.4.7    | Luftaustritte . . . . .   | 629        |
| 8.5      | Messtechnik für Kühlluftströmung . . . . .  | 630        |
| 8.5.1    | Flügelradanemometer . . . . .   | 630        |
| 8.5.2    | Druckmessungen . . . . .  | 631        |
| 8.5.3    | Optische Messmethoden . . . . .   | 632        |
| 8.5.4    | Hitzdraht-Anemometrie . . . . .   | 632        |
| <b>9</b> | <b>Aeroakustik – Umströmung, Durchströmung, besondere Effekte . . . . .</b>                 | <b>637</b> |
|          | Michael Fieles-Kahl, Matthias Riegel, Reinhard Blumrich und<br>Domenic Staron               |            |
| 9.1      | Bedeutung der Aeroakustik für das Innen- und Außengeräusch von<br>Kraftfahrzeugen . . . . . | 637        |
| 9.2      | Aeroakustische Geräuschenstehung . . . . .  | 642        |
| 9.3      | Aeroakustische Messtechnik . . . . .  | 644        |
| 9.3.1    | Aeroakustische Windkanäle . . . . .   | 644        |
| 9.3.2    | Messung von Innengeräuschen . . . . .   | 646        |
| 9.3.3    | Messung von Außengeräuschen . . . . .   | 647        |
| 9.3.4    | Messung von Körperschall . . . . .  | 653        |
| 9.3.5    | Schallquellenortung mithilfe von Spezialinstrumenten . . . . .                              | 655        |
| 9.4      | Hauptgeräuschquellen und Minderungsmöglichkeiten . . . . .                                  | 656        |
| 9.4.1    | Leckagen . . . . .  | 657        |
| 9.4.2    | Außenspiegel . . . . .  | 658        |
| 9.4.3    | Scheibenwischer . . . . .   | 660        |
| 9.4.4    | Antennen . . . . .  | 661        |
| 9.4.5    | A-Säule . . . . .   | 661        |
| 9.4.6    | Hohlraumresonanzen . . . . .  | 663        |
| 9.4.7    | Schiebedach-Öffnungsgeräusche . . . . .   | 665        |
| 9.4.8    | Radhäuser . . . . .   | 665        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 9.4.9  | Unterboden . . . . .   | 666 |
| 9.4.10 | Innengeräuschreduzierung durch Verwendung spezieller Akustikscheiben . . . . . | 667 |
| 9.4.11 | Cabriolets . . . . .   | 667 |
| 9.4.12 | Klimatisierungssysteme . . . . .   | 668 |
| 9.4.13 | Kühlerlüfter . . . . .   | 672 |
| 9.5    | Aspekte der realen Straßenfahrt . . . . .                                      | 674 |
| 9.5.1  | Instationäre Aeroakustik . . . . .   | 674 |
| 9.5.2  | Einfluss der Raddrehung auf das Innengeräusch . . . . .                        | 679 |

## Band 2

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>10</b> | <b>Hochleistungsfahrzeuge . . . . .</b>                     | <b>681</b> |
|           | Michael Pfadenhauer   |            |
| 10.1      | Einführung . . . . .  | 681        |
| 10.1.1    | Definition . . . . .  | 681        |
| 10.1.2    | Kleine Vorschau . . . . .                                   | 682        |
| 10.2      | Auszug aus der Geschichte . . . . .                         | 682        |
| 10.2.1    | Rennwagen . . . . .   | 682        |
| 10.2.2    | Rekordfahrzeuge . . . . .                                   | 690        |
| 10.2.3    | Sportwagen . . . . .  | 699        |
| 10.3      | Fahrzeugklassen . . . . .                                   | 705        |
| 10.4      | Rennstrecken . . . . .                                      | 713        |
| 10.5      | Reglements . . . . .  | 715        |
| 10.6      | Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahreigenschaften . . . . . | 718        |
| 10.6.1    | Luftwiderstand . . . . .                                    | 718        |
| 10.6.2    | Abtrieb . . . . .   | 722        |
| 10.6.3    | Balance . . . . .   | 726        |
| 10.6.4    | Fahrverhalten . . . . .                                     | 733        |
| 10.6.5    | Effizienz . . . . .   | 734        |
| 10.6.6    | Kühlung- und Belüftung . . . . .                            | 738        |
| 10.6.7    | Schräganströmung . . . . .                                  | 740        |
| 10.6.8    | Windschatten . . . . .                                      | 744        |
| 10.7      | Aerodynamik der Bauteile . . . . .                          | 746        |
| 10.7.1    | Grundkörper . . . . .                                       | 746        |
| 10.7.2    | Flügel . . . . .  | 752        |
| 10.7.3    | Spoiler und Gurneys . . . . .                               | 761        |
| 10.7.4    | Bodeneffekt . . . . .                                       | 768        |
| 10.7.5    | Diffusoren . . . . .  | 773        |
| 10.7.6    | Ein- und Auslässe . . . . .                                 | 782        |
| 10.7.7    | Luftleitelemente . . . . .                                  | 789        |
| 10.7.8    | Räder . . . . .   | 795        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>11 Nutzfahrzeuge</b> . . . . .                                   | 801 |
| Stephan Kopp  |     |
| 11.1 Zielgruppe . . . . .   | 801 |
| 11.2 Fahrwiderstände & Energieverbrauch . . . . .                   | 803 |
| 11.3 Grundlagen der Nutzfahrzeugaerodynamik . . . . .               | 806 |
| 11.3.1 Gerad- und Schräganströmung . . . . .                        | 806 |
| 11.3.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen . . . . .                      | 811 |
| 11.4 Werkzeuge der Nfz-Aerodynamik . . . . .                        | 815 |
| 11.4.1 Herausforderungen beim Nfz . . . . .                         | 815 |
| 11.4.2 Modellwindkanal . . . . .                                    | 816 |
| 11.4.3 Großwindkanal . . . . .                                      | 820 |
| 11.4.4 CFD-Simulation . . . . .                                     | 822 |
| 11.4.5 Fahrversuche mit Radnabennesseinrichtung . . . . .           | 823 |
| 11.5 Luftwiderstandsoptimierung beim Lkw . . . . .                  | 827 |
| 11.5.1 Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse . . . . . | 827 |
| 11.5.2 Fahrerhaus und Übergang zum Aufbau . . . . .                 | 829 |
| 11.5.3 Spiegel und Anbauteile am Fahrerhaus . . . . .               | 833 |
| 11.5.4 Motorraumdurchströmung . . . . .                             | 835 |
| 11.5.5 Chassis . . . . .  | 837 |
| 11.5.6 Auflieger & Aufbau . . . . .                                 | 842 |
| 11.5.7 Konzeptfahrzeuge . . . . .                                   | 850 |
| 11.6 Luftwiderstandsoptimierung beim Omnibus . . . . .              | 853 |
| 11.6.1 Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse . . . . . | 853 |
| 11.6.2 Front . . . . .  | 854 |
| 11.6.3 Rückspiegel . . . . .  | 857 |
| 11.6.4 Scheibenwischer . . . . .                                    | 859 |
| 11.6.5 Unterboden . . . . .   | 860 |
| 11.6.6 Räder und Radabdeckungen . . . . .                           | 860 |
| 11.6.7 Motorraumdurchströmung . . . . .                             | 861 |
| 11.6.8 Heck . . . . .   | 864 |
| 11.7 Aerodynamische Wechselwirkungen . . . . .                      | 865 |
| 11.7.1 Kolonnenfahrt . . . . .                                      | 865 |
| 11.7.2 Umsturz- und Seitenwindempfindlichkeit . . . . .             | 866 |
| 11.7.3 Aerodynamische Lasten auf Bauteile . . . . .                 | 868 |
| 11.7.4 Staubaufwirbelung . . . . .                                  | 868 |
| 11.7.5 Warmluftansaugung . . . . .                                  | 869 |
| 11.7.6 Abgasmanagement . . . . .                                    | 870 |
| 11.8 Fahrzeugverschmutzung . . . . .                                | 871 |
| 11.8.1 Aufgabenstellung und Untersuchungsmethoden . . . . .         | 871 |
| 11.8.2 Fremdverschmutzung . . . . .                                 | 874 |
| 11.8.3 Eigenverschmutzung . . . . .                                 | 875 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>12</b> | <b>Motorradaerodynamik</b> . . . . .  | 879 |
|           | Norbert Grün und Frank Ullrich  |     |
| 12.1      | Einleitung . . . . .  | 879 |
| 12.2      | Historischer Rückblick und heutige Motorradbauformen . . . . .                    | 880 |
| 12.2.1    | Historie der Motorradaerodynamik . . . . .  | 880 |
| 12.2.2    | Heutige Bauformen und Kategorien . . . . .  | 886 |
| 12.2.3    | Sonderbauformen . . . . .   | 893 |
| 12.3      | Aufgaben der Aerodynamik . . . . .  | 896 |
| 12.3.1    | Aerodynamische Kräfte und Momente . . . . .                                       | 896 |
| 12.3.2    | Aerodynamik und Längsdynamik . . . . .  | 899 |
| 12.3.3    | Aerodynamik und Querdynamik . . . . .   | 906 |
| 12.3.4    | Kühlung und Durchströmung . . . . .   | 920 |
| 12.3.5    | Wind- und Wetterschutz . . . . .  | 923 |
| 12.3.6    | Aeroakustik . . . . .   | 925 |
| 12.4      | Entwicklungsmethoden . . . . .  | 926 |
| 12.4.1    | Der Entwicklungsprozess . . . . .   | 926 |
| 12.4.2    | Simulation (CFD) . . . . .  | 927 |
| 12.4.3    | Windkanal . . . . .   | 940 |
| 12.4.4    | Fahrversuch . . . . .   | 951 |
| 12.4.5    | Ausblick – Weiterentwicklung der<br>Entwicklungsmethoden . . . . .                | 956 |
| 12.5      | Aerodynamische Gestaltung, Beispiele aus der Praxis . . . . .                     | 957 |
| 12.5.1    | Maßnahmen der aerodynamischen Gestaltung für<br>Widerstand und Auftrieb . . . . . | 957 |
| 12.5.2    | Gestaltung von Durchströmung, Kühlung und<br>Hitzeschutz . . . . .                | 962 |
| 12.5.3    | Maßnahmen für Wind- und Wetterschutz . . . . .                                    | 963 |
| 12.6      | Ausblick . . . . .  | 967 |
| <b>13</b> | <b>Schutzhelme</b> . . . . .  | 969 |
|           | Gerd Janke und Sebastian Reitebuch  |     |
| 13.1      | Schutzfunktion und Aufbau . . . . .   | 969 |
| 13.2      | Motorradhelme . . . . .   | 972 |
| 13.2.1    | Aerodynamik . . . . .   | 972 |
| 13.2.2    | Aeroakustik . . . . .   | 978 |
| 13.2.3    | Belüftung und Regentests . . . . .  | 989 |
| 13.3      | Helme für offene Rennfahrzeuge . . . . .  | 994 |
| 13.3.1    | Geschichtliches . . . . .   | 994 |
| 13.3.2    | Aerodynamik und Belüftung . . . . .   | 994 |
| 13.3.3    | Akustik . . . . .   | 996 |
| 13.4      | Mess- und Simulationstechnik . . . . .  | 999 |
| 13.4.1    | Abgrenzung . . . . .  | 999 |
| 13.4.2    | Windkanal . . . . .   | 999 |

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| 13.4.3    | Aerodynamische Kräfte . . . . .   | 999         |
| 13.4.4    | Aeroakustik und Kunstkopfmessstechnik . . . . .   | 1002        |
| 13.4.5    | Numerische Berechnungen der Strömung (CFD) . . . . .  | 1003        |
| <b>14</b> | <b>Windkanäle und Messtechnik . . . . .</b>   | <b>1007</b> |
|           | Edzard Mercker, Christoph Schönleber, Jorg-Dieter Vagt,<br>Jochen Wiedemann und Felix Wittmeier |             |
| 14.1      | Aufgabenstellung . . . . .  | 1007        |
| 14.2      | Aufbau und Funktion von Windkanälen . . . . .   | 1011        |
| 14.3      | Komponenten von Fahrzeugwindkanälen . . . . .   | 1015        |
| 14.3.1    | Die Windkanaldüse . . . . .   | 1015        |
| 14.3.2    | Die Messstrecke . . . . .   | 1022        |
| 14.3.3    | Der Kollektor . . . . .   | 1031        |
| 14.3.4    | Die Plenumshalle . . . . .  | 1034        |
| 14.3.5    | Die Luftführung . . . . .   | 1037        |
| 14.3.6    | Akustische Maßnahmen . . . . .  | 1040        |
| 14.3.7    | Bodensimulation . . . . .   | 1054        |
| 14.3.8    | Instationäre Strömungen und Böensimulation . . . . .  | 1064        |
| 14.4      | Interferenzeffekte zwischen Windkanal und Fahrzeug . . . . .                                    | 1069        |
| 14.4.1    | Grundidee der Windkanalkorrektur . . . . .  | 1070        |
| 14.4.2    | Windkanalkorrekturen in der geschlossenen<br>Messstrecke . . . . .                              | 1071        |
| 14.4.3    | Windkanalkorrekturen in der offenen Messstrecke . . . . .                                       | 1076        |
| 14.4.4    | Versperrungskorrekturen in Klima- und<br>Thermowindkanälen . . . . .                            | 1085        |
| 14.5      | Aerodynamische Messungen . . . . .  | 1088        |
| 14.5.1    | Versuchsablauf . . . . .  | 1089        |
| 14.5.2    | Messung der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .  | 1092        |
| 14.5.3    | Druckmessungen . . . . .  | 1100        |
| 14.5.4    | Messung aerodynamischer Kräfte und Momente . . . . .  | 1107        |
| 14.5.5    | Sichtbarmachen der Strömung . . . . .   | 1117        |
| 14.5.6    | Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung . . . . .  | 1121        |
| 14.5.7    | Motorkühlungstests . . . . .  | 1124        |
| 14.5.8    | Heizungs- und Klimatisierungstests . . . . .  | 1129        |
| 14.5.9    | Straßenmessungen . . . . .  | 1133        |
| 14.5.10   | Anforderungen der WLTP-Norm an Windkanäle . . . . .   | 1145        |
| 14.5.11   | Spezielle Ausrüstung in Klima- und<br>Thermowindkanälen . . . . .                               | 1146        |
| 14.6      | Messungen in verkleinertem Maßstab . . . . .  | 1149        |
| 14.7      | Ausgeführte Fahrzeugwindkanäle . . . . .  | 1155        |
| 14.7.1    | Windkanäle für Fahrzeuge im 1:1-Maßstab . . . . .   | 1156        |
| 14.7.2    | Modellwindkanäle . . . . .  | 1163        |

|           |  |             |
|-----------|--|-------------|
| 14.7.3    | Klima- und Thermowindkanäle . . . . .  | 1171        |
| 14.7.4    | Übersicht und Vergleichsmessungen . . . . .  | 1175        |
| 14.8      | Ausblick . . . . .   | 1177        |
| <b>15</b> | <b>Numerische Methoden</b> . . . . .   | <b>1179</b> |
|           | Thomas Blacha, Reinhard Blumrich, Norbert Grün, Fabian Rösler und<br>Thomas Schütz |             |
| 15.1      | Dreidimensionale Simulation reibungsbehafteter Strömungen . . . . .                | 1185        |
| 15.1.1    | Anforderungen und Eigenschaften von CFD-Verfahren . . . . .                        | 1185        |
| 15.1.2    | Grundzüge der kinetischen Gastheorie . . . . .                                     | 1188        |
| 15.1.3    | Lattice-Methoden . . . . .   | 1191        |
| 15.1.4    | Navier-Stokes-Verfahren . . . . .  | 1203        |
| 15.1.5    | Rotierende Geometrien (Räder, Lüfter) . . . . .                                    | 1260        |
| 15.1.6    | Poröse Medien (Wärmetauscher) . . . . .  | 1263        |
| 15.1.7    | Der Lösungsweg . . . . .   | 1265        |
| 15.1.8    | Hardware und Benchmarking . . . . .  | 1301        |
| 15.1.9    | Integration von CFD in den Entwicklungsprozess . . . . .                           | 1308        |
| 15.1.10   | Optimierung . . . . .  | 1310        |
| 15.1.11   | Ausblick . . . . .   | 1317        |
| 15.2      | Simulation der Aeroakustik von Fahrzeugen . . . . .                                | 1320        |
| 15.2.1    | Einleitung . . . . .   | 1320        |
| 15.2.2    | Berechnung der Quellgebiete . . . . .  | 1323        |
| 15.2.3    | Quellen und Schallfeld im Außenbereich . . . . .                                   | 1326        |
| 15.2.4    | Transfer in den Innenraum . . . . .  | 1332        |
| 15.2.5    | Beispiele aus der Praxis . . . . .   | 1337        |
| 15.2.6    | Zusammenfassung und Ausblick . . . . .   | 1346        |
|           | <b>Institute, Organisationen, Veranstaltungen</b> . . . . .                        | <b>1349</b> |
|           | <b>Formelzeichen</b> . . . . .   | <b>1355</b> |
|           | <b>Literatur</b> . . . . .   | <b>1367</b> |
|           | <b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . .  | <b>1417</b> |

---

## Über die Autoren

**Dr.-Ing. Wolf-Heinrich Hucho** studierte Maschinenbau an der TH Braunschweig. Von 1961 bis 1968 war er Assistent von Professor Schlichting und promovierte 1967 mit einem Thema aus der Schiffshydrodynamik. Ab 1968 arbeitete er als Versuchsingenieur bei der Volkswagen AG, zunächst als Leiter des großen Klimawindkanals, von 1969 bis 1978 als Leiter der Hauptabteilung Antriebstechnik in der Forschung. Danach war er als Entwicklungsleiter und Geschäftsführer bei namhaften Zulieferern tätig. Seit 1986 arbeitet er freiberuflich als Berater, Publizist und Dozent.

Er ist Herausgeber der ersten fünf Auflagen des vorliegenden Buchs und Autor der „Aerodynamik der stumpfen Körper“, ferner ist er Mitherausgeber der Buchreihe „Progress in Vehicle Aerodynamics“ sowie Autor des Buchs „Sindbad – von einem der auszog, das Fürchten zu lernen“. Zu dem Buch „Design und Technik“ sowie zum „Springer Handbook of Experimental Fluid Dynamics“ leistete er ausführliche Beiträge.

**Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Andreas Dillmann** studierte Maschinenbau an der Universität Karlsruhe. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Strömungsforschung in Göttingen und promovierte 1989 an der dortigen Universität mit einem Thema zur Keimbildung in kondensierenden Gasen. 1990 wechselte er zum Institut für Strömungsmechanik der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Göttingen und habilitierte sich 1995 an der Universität Hannover mit einem Thema zur Hochgeschwindigkeitsaerodynamik. Von 1998 bis 2003 war er Professor für Theoretische Strömungsmechanik an der Technischen Universität Berlin. Seit 2003 ist er Direktor des DLR-Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik in Göttingen und Professor für Aerodynamik an der dortigen Universität.

**Dr.-Ing. Teddy Woll** studierte von 1981 bis 1987 Wirtschaftsingenieurwesen/Elektrotechnik an der TU Darmstadt. Von 1987 bis 1994 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Institut für Elektromechanische Konstruktionen. Er promovierte über „Verfahren zur Messung des Augeninnendrucks bei geschlossenem Augenlid“ und gründete die



AKASOL, die Solar- und Elektroleichtfahrzeuge entwickelte und baute. Von 1994 bis 1995 verantwortete er bei der Micro Compact Car GmbH die Aerodynamik- und Gewichtsoptimierung und war beteiligt bei der Entwicklung alternativer Antriebe des Smart. Ab 1996 war er bei der Daimler AG in Sindelfingen in der Vorentwicklung Fahrzeuge tätig, seit April 1999 leitet er in der Daimler-Entwicklung die Abteilung Aerodynamik, Aeroakustik und Windkanalzentrum.

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Schütz** studierte von 2001 bis 2005 Maschinenwesen an der Universität Stuttgart. Anschließend promovierte er dort über numerische Simulation der Bremsenkühlung. Von 2008 bis 2013 verantwortete er bei der Audi AG in Ingolstadt die Aerodynamik- und Aeroakustikentwicklung mehrerer Modellreihen. 2014 wechselte er zur BMW AG nach München und wurde dort in den Führungskreis berufen. Er war dort Referent für Aerodynamik und Fahrdynamik, Gruppenleiter Aerodynamik BMWi und Konzepte sowie Gruppenleiter Aeroakustik und Dichtheit. Im Jahr 2020 wechselte er zu BMW Motorrad ins Werk Berlin und war dort bis 2021 Werksprojektleiter für die 4- und 6-Zylinder Motorräder. Seit Juli 2021 leitet die Werksprojekte aller Fahrzeuge. Seit 2011 hat er den Lehrauftrag der Technischen Universität Darmstadt für Fahrzeugaerodynamik am Institut für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) inne und wurde 2017 zum Honorarprofessor ernannt. Für seine Studienleistungen wurde er 2006 mit dem Arthur-Fischer-Preis der Universität Stuttgart ausgezeichnet, für seine Dissertation verlieh ihm die European Car Aerodynamics Research Association (ECARA) 2011 den ECARA Award.

**Dr.-Ing. Thomas Eberz** studierte Maschinenbau an der Universität Siegen. Von 1994 bis 2000 war er Assistent am Siegener Institut für Fluid- und Thermodynamik. Die Promotion erfolgte 2001 und hat den Titel: „Beiträge zur 3D-Kfz-Aerodynamik – Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Nachlaufströmung, ihrer Modellierung und Widerstandsreduktion“. 2000 wechselte er zur Continental AG und beschäftigte sich in der Zukunftsentwicklung mit aktiven Fahrerassistenzsystemen. Seit 2002 ist er bei den Ford-Werken in der Gesamtfahrzeugentwicklung tätig und leitet seit 2019 die Abteilung Aerodynamik und Fahrwiderstand.

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner** studierte von 1994 bis 1999 Fahrzeugtechnik an der Fachhochschule Ulm. Parallel durchlief er dort von 1996 bis 1998 ein Aufbaustudium in „Internationale Wirtschaft“. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart promovierte er in den Jahren 2000 bis 2003 zum Thema „Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind“. In den folgenden Jahren bekleidete er bei der Audi AG in Ingolstadt mehrere leitende Positionen. Während dieser Zeit erhielt er die Kamm-Jante-Medaille sowie den ECARA-Preis für seine Dissertation. 2009 erfolgte die Berufung in den Managementkreis, 2018 in den Oberen Managementkreis. 2019 wurde er an die Universität

Stuttgart berufen und leitet den Lehrstuhl Kraftfahrwesen am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart. Er ist außerdem Vorstandsmitglied des FKFS. Schwerpunkte seiner Forschungsarbeit sind Aerodynamik und -akustik, Fahrdynamik und -komfort sowie die Entwicklung und Anwendung virtueller Methoden in den genannten Fachgebieten.

**Dr.-Ing. David Schröck** studierte von 1999 bis 2001 Maschinenbau an der Universität Karlsruhe (TH) und von 2001 bis 2005 Maschinenwesen an der Universität Stuttgart. Von 2005 bis 2011 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter im Windkanal am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Er promovierte mit dem Thema „Eine Methode zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs unter böigem Seitenwind“. Für seine Dissertation verlieh ihm die Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e. V. die Kammjante-Medaille im Bereich Fahrzeugtechnik. Von 2011 bis 2013 war er bei der Adam Opel AG als Entwicklungsingenieur in der Aerodynamik und Aeroakustik tätig und wechselte dann zu General Motors in die USA. Dort leitete er bis 2017 als Projektleiter die Renovierung des Aerodynamic Laboratories und verantwortete die Aerodynamikentwicklung einer Truck Baureihe. Anschließend leitete er bei Opel innerhalb der Abteilung Noise and Vibration den Bereich Structure and Mechanical Functional Design. Seit 2020 leitet er die Aerodynamik Abteilung.

**Dipl.-Ing. Alexander Mößner** studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Von 1989 bis 1996 war er bei der Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG in der Aerodynamik tätig, von 1996 bis 1998 bei der Micro Compact Car GmbH, ebenfalls in der Aerodynamik. Seit 1998 arbeitet er bei der Daimler AG in der Abteilung Aerodynamik und Windkanäle für Mercedes-Benz-Fahrzeuge; er betreut dort verschiedene Fahrzeugbaureihen. Weiterer Tätigkeitsschwerpunkt ist die Querschnittsfunktion Zugfreihaltung und Komfort bei offenem Fahren für Cabriolets.

**Dr.-Ing. Michael Ade** studierte von 2009 bis 2015 Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Seit 2015 arbeitet er bei der Mercedes-Benz AG in der Abteilung Aerodynamik. 2019 schloss er dort seine Promotion über „Development of a Numerical Methodology for Water Management Simulations of Passenger Cars“ unter universitätsseitiger Betreuung durch die TU Darmstadt ab. Seit 2019 ist er im Team CFD als Berechnungsingenieur mit dem Schwerpunkt Zweiphasensimulation tätig.

**Dr.-Ing. Ralf Neuendorf** studierte von 1988 bis 1995 Physikalische Ingenieurwissenschaft an der TU Berlin. Von 1993 bis 1999 war er Research Scholar am AME Department

der University of Arizona und promovierte 1999 mit dem Thema „Turbulent Wall Jet Along a Convex Curved Surface“. Von 1999 bis 2009 war er in der Prüfstands- und Methodenentwicklung der BMW Group in München tätig und leitete zum Ende im Rahmen des Windkanalbauprojektes „Aerodynamisches Versuchszentrum“ als Teilprojektleiter die betrieblichen Anforderungen. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme der Prüfstände wechselte er für gut 10 Jahre in die aerodynamische Fahrzeugentwicklung der BMW Group und verantwortete die mittleren und großen Baureihen bevor er 2020 die Leitung der Simulation Längsdynamik im Bereich Fahrerlebnis übernahm.

**Dr. rer. nat. Reinhard Blumrich** studierte Physik an der Technischen Universität Darmstadt, wechselte danach an die Ruhr-Universität Bochum und promovierte dort 1998 auf dem Gebiet der akustischen und seismischen Überwachung von Fahr- und Flugzeugbewegungen. Von 1998 bis 2004 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen im Bereich der Verkehrslärmprognose tätig. Seit 2004 ist er Mitarbeiter des FKFS und war zunächst für die Berechnung der Fahrzeugakustik sowie seit 2008 zusätzlich für das Projektfeld Windkanalplanung und -beratung zuständig. Seit 2016 leitet er am FKFS den Bereich Fahrzeugakustik und -schwingungen sowie das Projektfeld Windkanalberatung.

**Dipl.-Ing. Michael Fieles-Kahl** studierte von 1995 bis 2001 Bauingenieurwesen an der Universität Stuttgart. Seit 2001 arbeitet er als Projektingenieur für Akustik und Schwingungen am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Seit 2019 ist er Lehrbeauftragter der Universität Stuttgart für das Fach Fahrzeugakustik am Institut für Fahrzeugtechnik (IFS) der Universität Stuttgart.

**Dr.-Ing. Matthias Riegel** studierte bis 1997 Allgemeiner Maschinenbau an der TU Stuttgart und begann anschließend am FKFS als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Fahrzeugakustik und -schwingungen mit dem Schwerpunkt Aeroakustik im Fahrzeugwindkanal. Seit 2009 ist er Gruppenleiter für akustische Mess- und Analysetechnik am FKFS und promovierte dort im Jahr 2010 mit einem Thema zur Bestimmung von Innengeräuschanteilen in Fahrzeugen.

**Dipl.-Ing. Michael Pfadenhauer** studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München. Von 1995 bis 1998 war er Versuchingenieur in der Aerodynamik der Audi AG. Von 1998 bis 2005 war er als Versuchingenieur bei Audi Sport verantwortlich für die aerodynamische Entwicklung von Touren-, Sport- und Rennwagen. 2005 wechselte er als Leiter Aerodynamik & Thermomanagement im Bereich Serie und Motorsport zur Dr. Ing.

h.c. F. Porsche AG in Weissach. Seit 2017 leitet er die Abteilung Akustik und Schwingungstechnik der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

**Dipl.-Ing. Stephan Kopp** studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München. Von 1997 bis 2000 war er Versuchsingenieur in der Karosserieentwicklung der Adam Opel AG. Von 2000 bis 2004 betreute er als Projektingenieur die aerodynamische Entwicklung der Corsa- und Zafira-Baureihen. In dieser Zeit verantwortete und realisierte er die aerodynamische Performance des Rekordfahrzeuges Eco Speedster. 2004 wechselte er zur MAN Nutzfahrzeuge AG und übernahm dort die Aerodynamikentwicklung für die Marken MAN und NEOPLAN. Im Jahre 2008 erfolgte die Berufung ins Management und er übernahm die Abteilungsleitung der Versuchsabteilung Karosserie, Heizung & Klimatisierung und der Aerodynamikentwicklung. Seit 2015 ist er außerdem Vorsitzender der ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) Nutzfahrzeugaerodynamik-Expertengruppe und hält Vorlesungen als Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart.

**Dr.-Ing. Norbert Grün** studierte von 1975 bis 1980 Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München. Nach drei Jahren als Aerodynamik-Entwicklungsingenieur im Unternehmensbereich Flugzeuge bei MBB Ottobrunn wechselte er als freier Mitarbeiter zu BMW. Dort beschäftigte er sich bis 1996 mit der Entwicklung eines Programms zur Simulation der Fahrzeugumströmung durch Kopplung von Potential- und Grenzschichttheorie. Dabei promovierte er 1991 an der TU München mit einem Thema zu 3D-Grenzschichtrechnungen. Anschließend arbeitete er von 1996 bis 2002 als technischer Berater der Exa Corporation, Boston, dem Hersteller des CFD-Codes PowerFLOW. Von 2002 bis zum Beginn seiner Altersteilzeit in 2013 war er schließlich bei BMW verantwortlich für den Simulationsseinsatz in der Aerodynamik von Automobilen und Motorrädern. Seitdem ist er als beratender Ingenieur tätig und hält außerdem Vorlesungen als Lehrbeauftragter an der OTH Regensburg sowie an der HS München und der Chalmers University in Göteborg.

**Dipl.-Ing. Frank Ullrich** studierte Fahrzeugtechnik, Studiengang Luftfahrzeuge, an der FH München, danach Weiterstudium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU München. 1983 arbeitete er bei MBB in Ottobrunn im Unternehmensbereich Drehflügler und Verkehr. Im gleichen Jahr wechselte er zur BMW AG als Versuchsingenieur für Pkw-Aerodynamik. Ab 1991 war er verantwortlich für Aerodynamik- und Karosserieversuch der HP Fahrzeuge bei der BMW Motorsport GmbH (später „M GmbH“). 2000 wechselte er zur BMW Technik GmbH als Projektingenieur für Aerodynamik und Akustik. Seit 2002 arbeitete er als Teamleiter der Motorrad-Aerodynamik der BMW AG und seit 2004 als Leiter des Akustikwindkanals und Aeroakustikteams. Seit Anfang 2014 Übernahme der Leitung Versuch aktive und integrale Fahrzeugsicherheit und ab 2019 zusätzlich verantwortlich für die Organisation und Durchführung von „Field Operational Tests“ und „Natural Driving Studies“ mit weltweit eingesetzten Fahrzeugflotten.

**Dipl.-Ing. Sebastian Reitebuch** studierte Physikalische Ingenieurwissenschaften an der TU-Berlin und arbeitete ab 1996 im Hermann-Föttinger-Institut für Thermo- und Fluidodynamik der TU-Berlin. Seit 2000 ist er Versuchingenieur am Akustikwindkanal der Schuberth GmbH.

**Dr.-Ing. Edzard Mercker** studierte Flugtechnik an der TU Berlin und promovierte 1981 im Fachbereich Physikalische Ingenieurwissenschaften. Nach Auslandsaufenthalten als wissenschaftlichen Mitarbeiter am Engineering Department der Cambridge University, England, und an der Adelaide University, Australien, war er 1982 bis 2004 Supervisor Aerodynamic-Projects am Deutsch-Niederländischen Windkanal. Von 2005 bis 2009 war er Mitarbeiter der BMW-Group und ist seit 2010 Senior Consultant am FKFS der Universität Stuttgart. Für seine Ingenieurstätigkeiten ist er mehrfach ausgezeichnet worden. Zweimal erhielt er der Arch. T. Colwell Merit Award der SAE, einen Co-Award der NASA und drei verschiedene Co-Awards von der American Helicopter Society.

**Dr.-Ing. Christoph Schönleber** studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Von 2010 bis 2014 arbeitete er bei der TWT GmbH in unterschiedlichen Projekten, überwiegend in den Bereichen Strömungssimulation und Methodenentwicklung. Anschließend wechselte er an die Universität Stuttgart und das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) in den Bereich Windkanalforschung, wo er 2020 promovierte. Seit 2019 ist er Projektleiter für Aerodynamik-Projekte am FKFS.

**Dr.-Ing. habil. Jorg-Dieter Vagt** studierte Luftfahrzeugbau an der Technischen Universität Berlin. Von 1967 bis 1983 arbeitete er in der Strömungsforschung am Hermann-Föttinger-Institut der TU-Berlin und promovierte 1970 mit einem Thema zur Strömungsmesstechnik. Nach der Habilitation 1979 im Fach Strömungslehre war er bis 1983 als Privatdozent tätig. Von 1983 bis 2005 arbeitete er als Entwicklungsingenieur in der Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG in verschiedenen Positionen u. a. als Leiter der Windkanäle. Von 1998 bis 2020 war er Lehrbeauftragter für das Fach Kraftfahrzeugaerodynamik an der Hochschule Esslingen und von 2006 bis 2020 Senior Consultant am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann** studierte von 1972 bis 1977 Maschinenbau an der Ruhr-Universität in Bochum. 1977 erhielt er ein Stipendium am von Kármán Institute for Fluid Dynamics in Rhode St. Genèse, Belgien, das er mit dem VKI Diploma abschloss. Ab 1978 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermo- und Fluidodynamik der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Strömungslehre bei Prof. Dr.-Ing.

K. Gersten. 1983 promovierte er zum Thema: „Einfluss von Ausblasen und Absaugen an durchlässigen Wänden auf Strömungen bei hohen Reynoldszahlen“. Ab 1984 arbeitete er bei der Audi AG in der Abteilung Karosserietechnik/Aerodynamik. Von 1995 bis 1998 war er Mitglied des Managements und Projektleiter für das Audi Windkanalzentrum. 1998 erfolgte die Berufung als Leiter des Lehrstuhls Kraftfahrwesen am damaligen Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart und Mitglied des Vorstands des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart. Auf Beschluss der wissenschaftlichen Kommission des Chinesisch-Deutschen Hochschul-Kollegs (CDHK) der Tongji-Universität Shanghai wurde er 2004 zum Professor des CDHK ernannt. 2009 wurde ihm für Verdienste um die soziale und wirtschaftliche Entwicklung Shanghais der Magnolia Silver Award der Stadt Shanghai verliehen. Seit seiner Pensionierung im Jahre 2019 ist er Senior Consultant des FKFS.

**Dr.-Ing. Felix Wittmeier** studierte Fahrzeug- und Motorentchnik an der Universität Stuttgart und promovierte dort 2014 mit einem Thema zur aerodynamischen Optimierung von Pkw-Reifen. Er ist seit 2008 am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren tätig und leitet seit 2017 den Bereich Modellwindkanal und Windkanalforschung.

**Dr.-Ing. Thomas Blacha** studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Stuttgart. Von 2006 bis 2012 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am DLR Stuttgart am Institut für Verbrennungstechnik. Währenddessen promovierte er über den Lehrstuhl „Verbrennungstechnik der Luft- und Raumfahrt“ der Universität Stuttgart mit dem Thema „Effiziente Rußmodellierung in laminaren und turbulenten Flammen unterschiedlicher Brennstoffe“. Anschließend wechselte er in die Automobilindustrie zur Audi AG nach Ingolstadt und arbeitet dort seitdem in der Eigenschaftsentwicklung für Aerodynamik, Aeroakustik und Sichtfreihaltung.

**Dr.-Ing. Fabian Rösler** studierte zunächst Maschinenbau an der Technischen Hochschule Nürnberg und spezialisierte sich dann im Hauptdiplom auf erneuerbare Energien an der Technischen Hochschule Ulm. Nach einem zweiten Diplomstudium an der Universität Bayreuth promovierte er 2014 in den Gebieten Thermodynamik und Wärmeübertragung an selbiger. Nach der erfolgreichen Promotion wechselte er in die Industrie und war bei einem Entwicklungsdienstleister für die CFD-Bewertung des Kühlluftmassenstroms für diverse Audi-Projekte verantwortlich. 2016 erfolgte sein Wechsel zur Audi AG in die Abteilung für CFD-Methodenentwicklung. Dort ist er für die CFD-Methoden der Außenaerodynamik mit der Software OpenFOAM zuständig und ist VW-Konzernansprechpartner für OpenFOAM.