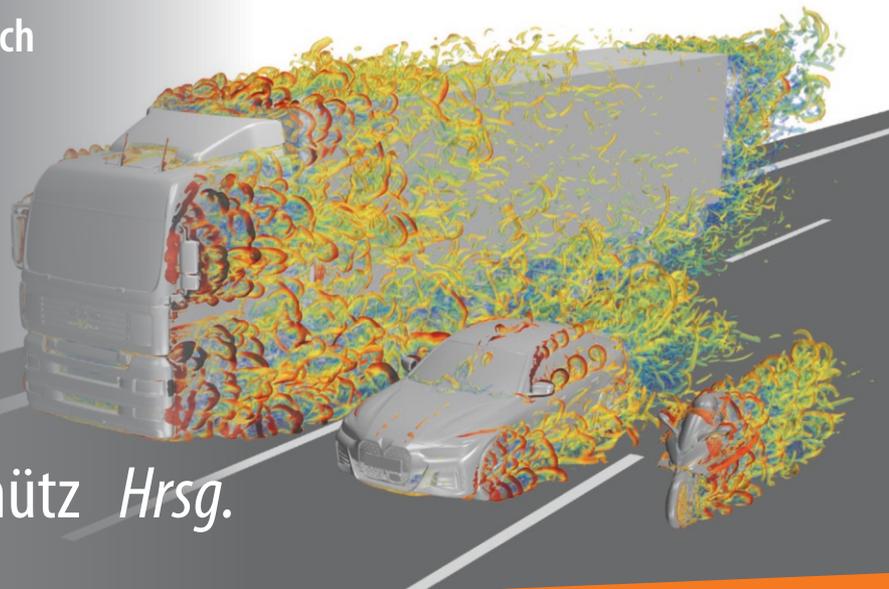


ATZ/MTZ-Fachbuch



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

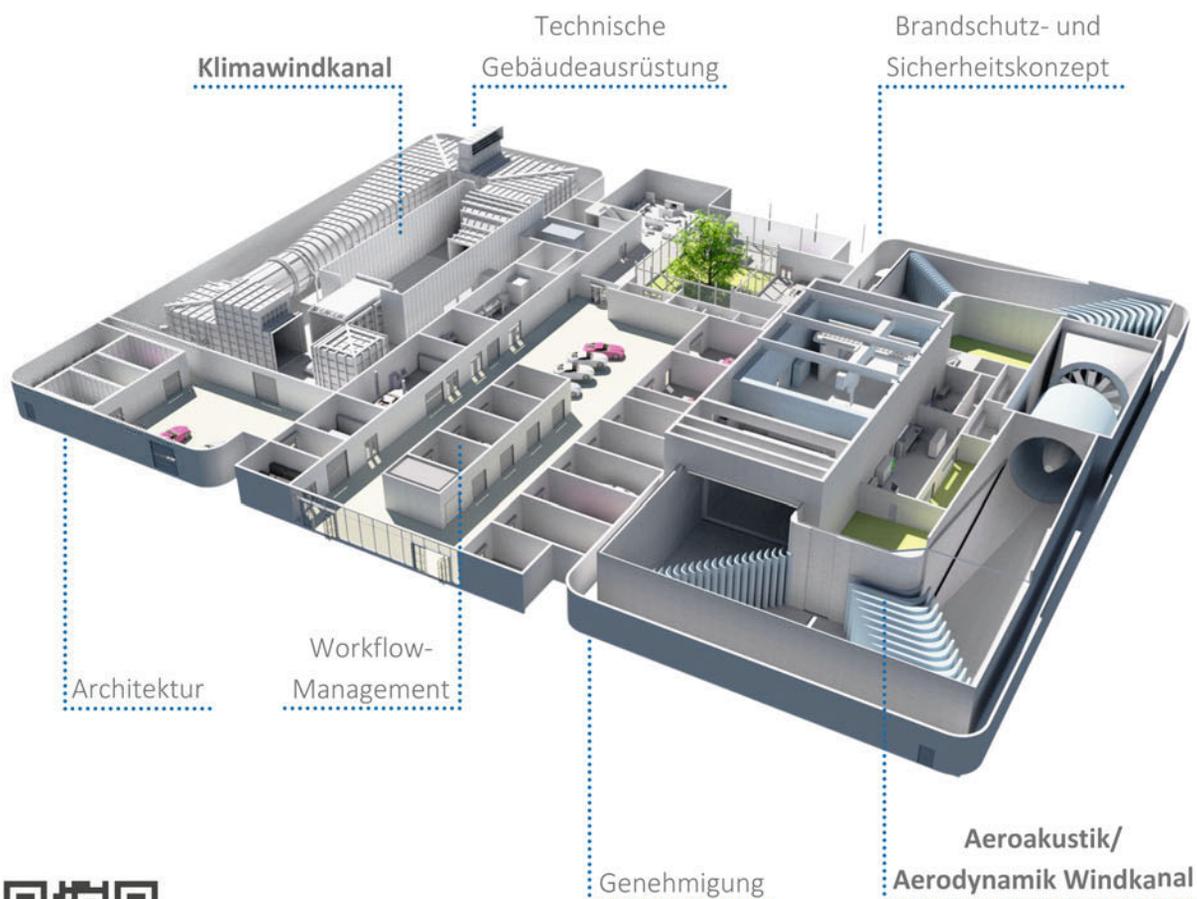
*In Gedenken an Dipl.-Volksw. Walter Karl Schütz
(1927–2021)*

„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

1	Einführung	1
	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
2	Physikalische Grundlagen der Aerodynamik	83
	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
3	Reichweite, Verbrauch und Fahrleistungen	169
	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 ab Steckdose	183
3.4	CO ₂ -Emissionen und Verbrauch	184
3.4.1	Verbrauchsberechnung	184
3.4.2	Verbrauchsmessung, Abgasgesetze und CO ₂ -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 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 ₂ -Gesetzgebung	199
3.7.1	Gesetze in der EU	199
3.7.2	Gesetze in USA	200
4	Aerodynamische Kräfte und Momente an Straßenfahrzeugen	201
	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
5	Beeinflussung der aerodynamischen Kräfte und Momente	285
	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 Motorraumdurchströmung	371
5.3.3	Stoß- und Impulsverluste beim Kühlluftaustritt	375
5.3.4	Wechselwirkung von Kühlluft 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
6	Aerodynamik und Fahrstabilität	449
	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
7	Funktion, Sicherheit und Komfort	523
	Michael Ade und Alexander Mößner	
7.1	Bauteilbelastung	524
7.1.1	Bauteillasten und deren Bestimmung	524
7.1.2	Türen, Klappen, Außenspiegel, Stoßfänger, 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
8	Kühlung und Durchströmung	585
	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
9	Aeroakustik – Umströmung, Durchströmung, besondere Effekte	637
	Michael Fieles-Kahl, Matthias Riegel, Reinhard Blumrich und Domenic Staron	
9.1	Bedeutung der Aeroakustik für das Innen- und Außengeräusch von 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

10	Hochleistungsfahrzeuge	681
	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

11 Nutzfahrzeuge	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

12	Motorradaerodynamik	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 Entwicklungsmethoden	956
12.5	Aerodynamische Gestaltung, Beispiele aus der Praxis	957
12.5.1	Maßnahmen der aerodynamischen Gestaltung für Widerstand und Auftrieb	957
12.5.2	Gestaltung von Durchströmung, Kühlung und Hitzeschutz	962
12.5.3	Maßnahmen für Wind- und Wetterschutz	963
12.6	Ausblick	967
13	Schutzhelme	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
14	Windkanäle und Messtechnik	1007
	Edzard Mercker, Christoph Schönleber, Jorg-Dieter Vagt, 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 Messstrecke	1071
14.4.3	Windkanalkorrekturen in der offenen Messstrecke	1076
14.4.4	Versperrungskorrekturen in Klima- und 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 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
15	Numerische Methoden	1179
	Thomas Blacha, Reinhard Blumrich, Norbert Grün, Fabian Rösler und 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
	Institute, Organisationen, Veranstaltungen	1349
	Formelzeichen	1355
	Literatur	1367
	Stichwortverzeichnis	1417

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.