

Wolf-Heinrich Hucho (Hrsg.)

Aerodynamik des Automobils

**Strömungsmechanik, Wärmetechnik,
Fahrdynamik, Komfort**

5., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1182 Abbildungen und 49 Tabellen

Autoren

Syed R. Ahmed
Jürgen Bachmann
Bernward Bayer
Thorsten Frank
Hans Götz
Holger Großmann
Martin Helfer
Patrick Höfer
Wolf-Heinrich Hucho
Dietrich Hummel
Gerd Janke
Wigbert Kohl
Wolfgang Kramer

Lothar Krüger
Manfred Lentzen
Ludger Lührmann
Alexander Mößner
Görgün Necati
Ralf Neuendorf
Michael Pfadenhauer
Jörg Rothhämel
Oliver Schimpf
Frank Ullrich
Teddy Woll
Bernhard Zuck



ATZ/MTZ-Fachbuch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

Wolf-Heinrich Hucho

1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.1.1	Grundzüge der Automobil-Aerodynamik.....	1
1.1.2	Eigenheiten der Fahrzeugaerodynamik.....	10
1.1.3	Angrenzende Fachgebiete.....	13
1.2	Geschichtliche Entwicklung.....	15
1.2.1	Vorschau.....	15
1.2.2	„Geborgte“ Formen.....	17
1.2.3	Stromlinienformen.....	19
1.2.4	Erste Parametervariationen.....	33
1.2.5	Das Kamm-Heck.....	34
1.2.6	Metamorphose von der Kutsche zum Automobil.....	37
1.2.7	Die Ponton-Karosserie.....	38
1.2.8	Einvolumen-Körper.....	41
1.2.9	Schräganströmung und Richtungsstabilität.....	45
1.2.10	Nutzfahrzeuge.....	48
1.2.11	Motorräder und Schutzhelm.....	52
1.2.12	Innere Strömungen.....	53
1.3	Entwicklungsstrategien.....	54
1.3.1	Detailoptimierung.....	54
1.3.2	Formoptimierung.....	56
1.3.2.1	Strategie.....	56
1.3.2.2	Grundkörper.....	57
1.3.2.3	Entwicklung der Form.....	59
1.4	Gegenwart und zukünftige Trends.....	62
1.4.1	Stand der Technik.....	62
1.4.2	Entwicklungsaufwand.....	68
1.5	Aerodynamik und Design.....	69
1.6	Bezeichnungen.....	77

2 Einige Grundzüge der Strömungsmechanik

Dietrich Hummel

2.1	Stoffeigenschaften inkompressibler Fluide.....	79
2.1.1	Dichte.....	79
2.1.2	Viskosität.....	79
2.1.3	Wärmeleitfähigkeit.....	80
2.2	Strömungsprobleme an Kraftfahrzeugen.....	80
2.2.1	Umströmung.....	81
2.2.2	Durchströmung.....	82
2.3	Umströmungsprobleme.....	82
2.3.1	Grundgleichungen für reibungslose, inkompressible Außenströmung..	82
2.3.2	Anwendungsbeispiele.....	83
2.3.3	Reibungseinflüsse.....	85

2.3.3.1	Laminare und turbulente Grenzschichtausbildung	85
2.3.3.2	Ablösung	88
2.3.3.3	Reibungswiderstand	89
2.3.3.4	Druckwiderstand	91
2.3.3.5	Gesamtkräfte und -momente	95
2.3.3.6	Temperaturgrenzschichten	96
2.3.4	Sonderprobleme	100
2.3.4.1	Geräusche	100
2.3.4.2	Mehrkörperprobleme	101
2.3.4.3	Inhomogenitäten	104
2.4	Durchströmungsprobleme	106
2.4.1	Grundgleichungen für inkompressible Strömung	106
2.4.2	Anwendungsbeispiele	107
2.4.2.1	Laminare und turbulente Rohrströmung	107
2.4.2.2	Rohrkrümmer	109
2.4.2.3	Einlaufkanten	110
2.4.2.4	Örtliche Querschnittsverengungen	111
2.4.2.5	Querschnittserweiterungen	111
2.4.2.6	Reihenschaltung von Verlusten	113
2.4.2.7	Verzweigungen und Zusammenflüsse	114
2.4.2.8	Parallelschaltung von Verlusten	117
2.5	Zusammenwirken von Umströmung und Durchströmung bei Fahrzeugen	118
2.6	Bezeichnungen	119

3 Verbrauch und Fahrleistungen

Teddy Woll

3.1	Stellenwert des Luftwiderstandes	123
3.2	Theorie der Fahrwiderstände	125
3.2.1	Rollwiderstand	126
3.2.2	Luftwiderstand	127
3.2.3	Hangabtriebskräfte	128
3.2.4	Beschleunigungskräfte	128
3.2.5	Gesamt-Fahrwiderstand	129
3.2.6	Beispiel	129
3.3	Fahrleistungen	130
3.3.1	Beschleunigung und Elastizität	130
3.3.2	Steigfähigkeit	132
3.3.3	Höchstgeschwindigkeit	133
3.4	Verbrauch	134
3.4.1	Verbrauchsberechnung	134
3.4.2	Verbrauchsmessung und CO ₂ -Äquivalente	136
3.5	Fahrzyklen	138
3.5.1	Historie	138
3.5.2	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	139
3.5.3	US-Amerikanische Zyklen	140
3.5.4	Japanische Zyklen	141
3.5.5	Reale Zyklen	141

3.6	Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung	142
3.6.1	Energieflussdiagramm	142
3.6.2	Motorwirkungsgrad und -kennfelder	143
3.6.3	Nebenaggregate	145
3.6.4	Getriebe	145
3.6.5	Fahrzeugmasse	147
3.6.6	Rollwiderstand	148
3.6.7	Luftwiderstand	149
3.7	Luftwiderstandsreduzierende Maßnahmen	150
3.7.1	Möglichkeiten zur Widerstandsreduktion	150
3.7.2	Gewichtsäquivalent	150
3.7.3	Amortisationsbetrachtung	151
3.8	Flottenverbrauch und geplante Gesetze	152
3.8.1	Geplante Gesetze in der EU - freiwillige Selbstverpflichtung	153
3.8.2	Gesetze in USA	154
3.9	Bezeichnungen	154

4 Der Luftwiderstand von Personenwagen

Wolf-Heinrich Hucho

4.1	Das Automobil — ein stumpfer Körper	157
4.2	Formen der Ablösung an einem Pkw	159
4.2.1	Symmetrische Strömung	159
4.2.2	Mechanismen bei der Ablösung	160
4.2.2.1	Kinematik	160
4.2.2.2	Nichtperiodisches Totwasser	162
4.2.2.3	Periodisches Totwasser	163
4.2.2.4	Totwasser mit ringförmigem Wirbel	164
4.2.2.5	Ablösung an schrägen Kanten	164
4.2.3	Instationäre Effekte	165
4.2.3.1	Quer- und Ringwirbel	165
4.2.3.2	Längswirbel	169
4.3	Möglichkeiten, den Luftwiderstand zu analysieren	169
4.3.1	Ansätze für die Betrachtung	169
4.3.2	Physikalische Mechanismen	170
4.3.3	Ort des Entstehens	172
4.3.4	Wirkung auf die Umgebung	174
4.3.5	Widerstand und Auftrieb	177
4.4	Teilwiderstände	179
4.4.1	Möglichkeiten für die Beobachtung	179
4.4.2	Vorderwagen	180
4.4.3	Windschutzscheibe und Λ -Säule	187
4.4.4	Dach	193
4.4.5	Heck	195
4.4.5.1	Geometrische Varianten	195
4.4.5.2	Vollheck	196
4.4.5.3	Fließheck	202
4.4.5.4	Stufenheck	212
4.4.6	Grundriss und Seitenteile	218

4.4.7	Unterseite, Räder und Radhäuser.....	220
4.4.7.1	Gemeinsame Behandlung.....	220
4.4.7.2	Unterboden.....	222
4.4.7.3	Räder und Radhäuser.....	225
4.4.8	Spoiler.....	234
4.4.8.1	Wozu überhaupt Spoiler?.....	234
4.4.8.2	Bugspoiler.....	235
4.4.8.3	Heckspoiler.....	241
4.4.9	Anbauteile.....	244
4.4.10	Durchströmwiderstände.....	246
4.4.11	Wechselwirkungen.....	251
4.5	Ansätze zu einer Systematisierung.....	252
4.5.1	Ordnung der Versuchsergebnisse.....	252
4.5.2	Verfahren zur Abschätzung des Widerstandes.....	254
4.6	Wechselwirkungen mit anderen Fahrzeugen.....	257
4.6.1	Pkw mit Anhänger.....	257
4.6.2	Konvoi-Fahren.....	263
4.7	Vorgehen während der Entwicklung.....	265
4.7.1	Formulierung der Aufgabe.....	265
4.7.2	Ablauf der Entwicklung.....	267
4.7.3	Beispiele aus der Entwicklung.....	269
4.8	Widerstand von Serienfahrzeugen.....	271
4.8.1	Bewertung von Versuchsergebnissen.....	271
4.8.2	Ausstattung, Motorisierung.....	271
4.8.3	Fahrzeuglage.....	273
4.8.4	Dilemma Stirnfläche.....	276
4.8.5	Widerstands-Daten nach EADE.....	276
4.9	Ansätze für eine weitere Reduzierung des Widerstandes.....	278
4.10	Bezeichnungen.....	283

5 Richtungsstabilität

Lothar Krüger, Manfred Lentzen

5.1	Einführung.....	285
5.2	Aerodynamik und Fahrstabilität — Geschichtliche Entwicklung.....	286
5.3	Natürlicher Wind und Seitenwind.....	289
5.4	Entstehung aerodynamischer Kräfte und Momente.....	293
5.5	Aerodynamik und Fahrverhalten.....	295
5.5.1	Auftrieb bei Geradeausfahrt.....	295
5.5.2	Kurvenfahrt.....	299
5.5.3	Lastwechselreaktionen.....	303
5.5.4	Einfluss der Luftkräfte auf das Bremsverhalten.....	304
5.5.5	Fahrverhalten bei Seitenwind.....	308
5.6	Einfluss der Fahrzeugform auf die aerodynamischen Kräfte und Momente.....	317
5.6.1	Auftrieb und Nickmoment.....	318
5.6.2	Seitenkraft und Giermoment.....	321
5.6.3	Rollmoment.....	329
5.6.4	Vergleich der Grundformen.....	331
5.7	Aerodynamische Effekte der Komponenten.....	332
5.7.1	Kühlluftströmune.....	333

5.7.2	Fugen und Öffnungen.....	333
5.7.3	Außenspiegel.....	333
5.1.4	Reifen, Räder und Unterboden.....	334
5.7.5	Aerodynamische Anbauteile.....	335
5.7.6	Dachlasten.....	336
5.8	Instationäre Kräfte und Momente.....	338
5.8.1	Transiente Einflüsse auf den Seitenkraft- und Giermomentenverlauf...	338
5.8.2	Turbulenz und deren Einfluss auf Auftrieb, Seitenkraft und Giermoment.....	343
5.9	Aerodynamische Interferenzen.....	345
5.9.1	Kolonnenfahrt.....	346
5.9.2	Überholvorgänge.....	347
5.9.3	Fahren mit Anhänger.....	351
5.10	Test- und Bewertungsmethoden.....	355
5.10.1	Aufgabe und Ansätze zur Lösung.....	355
5.10.2	Messungen im Windkanal.....	356
5.10.2.1	Vorteile und Einschränkungen.....	356
5.10.2.2	Stationäre Strömung, stehendes Modell.....	357
5.10.2.3	Stationäre Strömung, bewegtes Modell.....	357
5.10.2.4	Instationäre Strömung, stehendes Modell.....	358
5.10.3	Fahrdynamische Berechnungen.....	359
5.10.4	Fahrsimulator.....	360
5.10.5	Messungen auf der Straße.....	363
5.10.5.1	Fahrversuche an der Seitenwindanlage.....	363
5.10.5.2	Fahrversuche bei natürlichem Wind.....	366
5.11	Bezeichnungen.....	371
6	Funktion, Sicherheit und Komfort	
	<i>Patrick Höfer, Alexander Mößner</i>	
6.1	Lokale Strömungsmechanismen und deren Auswirkung.....	373
6.2	Strömungsstrukturen und deren Analyse.....	374
6.2.1	Strömungsphänomene.....	374
6.2.2	Sichtbarmachung der Strömung.....	375
6.2.3	Druck- und Geschwindigkeitsverteilung.....	380
6.3	Bauteilbelastung.....	385
6.3.1	Bauteillasten und deren Bestimmung.....	385
6.3.2	Türen, Klappen und Außenspiegel.....	386
6.3.3	Scheibenwischer.....	389
6.4	Belüftung, Bauteil- und Aggregatekühlung.....	395
6.4.1	Be- und Entlüftung des Fahrzeuginnenraums.....	395
6.4.2	Bauteiltemperaturen im Motorraum.....	396
6.4.3	Kühlung der Bremsen.....	398
6.5	Komfort bei offenem Fahren.....	399
6.5.1	Zielsetzung.....	399
6.5.2	Strömung bei geöffnetem Verdeck.....	400
6.5.3	Windgeräuschenstehung bei Cabriolets.....	401
6.5.4	Thermischer Komfort.....	401
6.5.5	Konstruktive Lösungen- Cabriolets.....	407
6.5.6	Konstruktive Lösungen- Schiebedächer.....	409

6.6	Schmutzfreihaltung.....	410
6.6.1	Fremd- und Eigenverschmutzung.....	410
6.6.1.1	Ursachen der Fremdverschmutzung.....	411
6.6.1.2	Ursachen der Eigenverschmutzung.....	414
6.6.2	Strömungstechnische Phänomene der Verschmutzung.....	416
6.6.2.1	Physikalische Grundlagen.....	416
6.6.2.2	Tropfen in freier Strömung.....	416
6.6.2.3	Mechanismen beim Aufprall von Tropfen.....	417
6.6.2.4	Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit.....	419
6.6.3	Schmutzfreihaltungsuntersuchung im Windkanal.....	420
6.6.3.1	Simulation der Fremdverschmutzung.....	420
6.6.3.2	Simulation der Eigenverschmutzung.....	421
6.6.4	Konstruktive Lösungen zur Reduktion der Fahrzeugverschmutzung....	421
6.6.4.1	Schmutzfreihaltung von Windschutzscheibe und Scheinwerfern.....	421
6.6.4.2	Vermeidung einer überlaufenden /1-Säule.....	422
6.6.4.3	Optimierung des Außenspiegels.....	424
6.6.4.4	Reduzierung der Heckscheibenverschmutzung (Fremdverschmutzung).....	426
6.6.4.5	Schmutzfreihaltung von Tür- und Heckdeckelgriffen.....	427
6.6.4.6	Schmutzfreihaltung von Heckscheibe (Eigenverschmutzung) und Rücklichtern.....	428
6.6.4.7	Reduzierung von Sprühnebel im Fahrzeugnachlauf.....	429
6.7	Bezeichnungen.....	430

7 Aeroakustik

Martin Helfer

7.1	Fahrzeuggeräusche.....	431
7.2	Entstehung von aerodynamischen Geräuschen.....	434
7.3	Hauptgeräuschquellen und Minderungsmöglichkeiten.....	436
7.3.1	Leckagen.....	436
7.3.2	Außenspiegel.....	437
7.3.3	Scheibenwischer.....	439
7.3.4	Antennen.....	440
7.3.5	/1-Säule.....	442
7.3.6	Hohlraumresonanzen.....	443
7.3.7	Radhäuser.....	446
7.3.8	Unterboden.....	446
7.3.9	Innengeräusch-Reduzierung durch Erhöhung der Verglasungsstärke...	448
7.3.10	Cabriolets.....	448
7.4	Psychoakustische Gesichtspunkte.....	450
7.5	Bezeichnungen.....	451

8 Hochleistungsfahrzeuge

Michael Pfadenhauer

8.1	Einführung.....	453
8.1.1	Definition.....	453
8.1.2	Kleine Vorschau.....	453

8.2	Auszug aus der Geschichte.....	454
8.2.1	Rennwagen.....	454
8.2.2	Rekordfahrzeuge.....	460
8.2.2.1	Höchstgeschwindigkeit.....	460
8.2.2.2	Schallnahe Geschwindigkeiten.....	462
8.2.2.3	Andere Rekordziele.....	463
8.2.3	Sportwagen.....	468
8.3	Fahrzeugklassen.....	472
8.4	Rennstrecken.....	479
8.5	Reglements.....	480
8.6	Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten.....	482
8.6.1	Luftwiderstand.....	482
8.6.2	Abtrieb.....	486
8.6.3	Balance.....	489
8.6.4	Fahrverhalten.....	495
8.6.5	Effizienz.....	497
8.6.6	Kühlung und Belüftung.....	500
8.6.7	Schräganströmung.....	502
8.6.8	Windschatten.....	505
8.7	Aerodynamik der Bauteile.....	507
8.7.1	Grundkörper.....	507
8.7.2	Flügel.....	511
8.7.2.1	Aufgaben.....	511
8.7.2.2	Funktion.....	512
8.7.2.3	Widerstand.....	515
8.7.2.4	Induzierter Widerstand.....	517
8.7.2.5	Mehrere Flügel.....	518
8.7.3	Spoiler und Gurneys.....	521
8.7.4	Bodeneffekt.....	526
8.7.5	Diffusoren.....	530
8.7.5.1	Funktion.....	530
8.7.5.2	Auslegung.....	531
8.7.5.3	Erzeugung von Abtrieb.....	531
8.7.5.4	Reduktion des Widerstandes.....	534
8.7.5.5	Schlussfolgerung.....	536
8.7.6	Ein- und Auslässe.....	538
8.7.7	Luftleitelemente.....	545
8.7.8	Räder.....	547
8.8	Bezeichnungen.....	550

9 Motorräder

Frank Ullrich, Bernward Bayer, Jürgen Bachmann

9.1	Prolog.....	553
9.2	Überblick über die Entwicklung der Motorrad-Aerodynamik.....	554
9.2.1	Historie.....	554
9.2.2	Heutiger Stand der Technik.....	559
9.3	Aerodynamik und Fahrdynamik.....	563
9.3.1	Fahrleistungen.....	563
9.3.2	Fahrstabilität.....	565

9.3.3	Fahrverhalten bei Seitenwind.....	567
9.3.4	Auftriebseffekte.....	569
9.3.5	Kurvenfahrt.....	571
9.4	Entwicklungsmethoden.....	573
9.4.1	Untersuchungen im Windkanal.....	573
9.4.1.1	Messungen an Solomotorrädern.....	573
9.4.1.2	Durchströmung.....	582
9.4.1.3	Aeroakustik.....	583
9.4.1.4	Fahrzeugverschmutzung.....	584
9.4.2	Numerische Berechnung der Umströmung (CFD).....	586
9.4.2.1	Simulationsmethode und Modellgenerierung.....	587
9.4.2.2	Validierung.....	588
9.4.2.3	Neue Analysemöglichkeiten mit CFD.....	591
9.4.2.4	Zukunftsaussichten von CFD in der Motorradentwicklung....	594
9.4.3	Fahrversuch.....	595
9.4.3.1	Fahrleistungen und Fahrstabilität.....	595
9.4.3.2	Seitenwind.....	597
9.4.3.3	Wind- und Wetterschutz.....	598
9.4.3.4	Verschmutzung.....	599
9.4.3.5	Aeroakustik.....	600
9.5	Sonderbauformen.....	601
9.5.1	Gespanne.....	601
9.5.2	Roller.....	602
9.5.3	CI und Ecomobile.....	602
9.6	Ausblick.....	603
9.7	Bezeichnungen.....	604

10 Schutzhelme

Gerd Janke, Jörg Rothhämel, Oliver Schimpf

10.1	Aufbau und Schutzfunktion.....	605
10.2	Motorradhelme.....	607
10.2.1	Aerodynamik.....	607
10.2.1.1	Entwicklungsziele.....	607
10.2.1.2	Helmgeometrie.....	607
10.2.1.3	Blickrichtung.....	609
10.2.1.4	Sitzposition und Frontscheibe.....	611
10.2.2	Aeroakustik.....	613
10.2.2.1	Entwicklungsziele und Lärmbelastung.....	613
10.2.2.2	Mechanismen und Einflussparameter der Schallerzeugung....	616
10.2.2.3	Wahrnehmung von Umweltsignalen.....	619
10.2.2.4	Ansätze zur Lärmreduktion.....	621
10.2.3	Belüftung und Regentests.....	622
10.3	Helme für offene Rennfahrzeuge.....	625
10.3.1	Geschichtliches.....	625
10.3.2	Aerodynamik und Belüftung.....	625
10.3.3	Akustik.....	627
10.4	Mess- und Simulationstechnik.....	629
10.4.1	Abgrenzung.....	629
10.4.2	Windkanal.....	629

10.4.3	Aerodynamische Kräfte.....	630
10.4.4	Aeroakustik und Kunstkopfmessstechnik.....	632
10.4.5	Numerische Berechnungen der Strömung (CFD).....	633
10.5	Bezeichnungen.....	634

11 Nutzfahrzeuge

Hans Götz, Thorsten Frank

11.1	Zielgruppe.....	635
11.2	Fahrwiderstände und Kraftstoffverbrauch.....	636
11.3	Auswirkung luftwiderstandsreduzierender Maßnahmen auf den Kraftstoffverbrauch.....	638
11.4	Luftwiderstandsbeiwerte verschiedener Nutzfahrzeuge.....	643
11.4.1	Symmetrische Anströmung.....	643
11.4.2	Schräganströmung.....	644
11.4.3	Windeinflüsse — Abgrenzung des Schiebewinkels.....	644
11.4.4	Charakterisierung des Luftwiderstandes im realen Fahrbetrieb.....	645
11.5	Reduzierung des Luftwiderstandes.....	647
11.5.1	Spielraum für aerodynamische Maßnahmen bei Nutzfahrzeugen.....	647
11.5.2	Optimierung im Windkanal - Probleme der Modellmesstechnik.....	647
11.5.3	Luftwiderstandsoptimierung beim Lkw.....	649
11.5.3.1	Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse.....	649
11.5.3.2	Teilwiderstände - Interferenz.....	651
11.5.3.3	Fahrerhaus-Formgebung.....	652
11.5.3.4	Luftwiderstandsmindernde Anbauteile für Lkw.....	656
11.5.3.5	Aerodynamisch optimierter Lastzug.....	661
11.5.3.6	Aerodynamisch ausgelegte Sattelzugkonzepte.....	663
11.5.3.7	Anbauteile am Heck.....	666
11.5.3.8	Aerodynamische Optimierungsmaßnahmen am Autotransporter.....	667
11.5.4	Luftwiderstandsoptimierung beim Omnibus und bei Schnelltransporter-Kastenwagen.....	668
11.5.4.1	Randbedingungen.....	668
11.5.4.2	Charakteristische Strömungsverhältnisse an einfachen geometrischen Körpern.....	668
11.5.4.3	Optimieren der Frontpartie.....	671
11.5.4.4	Optimierendes Heckbereichs.....	675
11.5.4.5	Trends im Bus-Design.....	677
11.6	Aerodynamische Wechselwirkungen.....	678
11.6.1	Kolonnenbildung.....	678
11.6.2	Tunneldurchfahrt.....	680
11.7	Fahrzeugverschmutzung.....	685
11.7.1	Aufgabenstellung.....	685
11.7.2	Fremdverschmutzung.....	685
11.7.3	Eigenverschmutzung.....	687
11.7.3.1	Verringerung der Lkw-Verschmutzung.....	687
11.7.3.2	Verringerung der Seitenwandverschmutzung beim Omnibus.....	689
11.7.3.3	Verringerung der Heckflächenverschmutzung.....	692

11.7.4	Sprühwasserbeaufschlagung nachfolgender Fahrzeuge.....	694
11.7.4.1	Neuer Ansatz zur Sprühfahnenreduktion.....	699
11.7.4.2	Fahrzeugfestes Messsystem.....	703
11.8	Bezeichnungen.....	703

12 Kühlung und Durchströmung

Bernhard Zuck, Wolfgang Kramer, Ralf Neuendorf

12.1	Anforderungen.....	705
12.1.1	Motorkühlung.....	705
12.1.1.1	Höchstgeschwindigkeit.....	706
12.1.1.2	Leerlauf.....	707
12.1.1.3	Fahrt mit Anhänger.....	707
12.1.1.4	Bergfahrten.....	707
12.1.2	Klimatisierung.....	707
12.1.3	Bremsenkühlung.....	708
12.1.4	Komponentenkühlung.....	709
12.1.4.1	Getriebe.....	709
12.1.4.2	Achsgetriebe.....	709
12.1.4.3	Bauteile.....	709
12.1.5	Kühlluftbedarf.....	709
12.1.6	Aerodynamik.....	710
12.1.7	Verbrauch.....	710
12.1.8	Weitere Einflussparameter.....	711
12.1.8.1	Fahrzeugdesign.....	711
12.1.8.2	Bauraum.....	711
12.1.8.3	Sicherheit.....	711
12.1.8.4	Akustik.....	711
12.1.8.5	Motorfrischluft.....	712
12.2	Auslegung des Kühlsystems.....	712
12.2.1	Grundlagen der Wärmeübertragung.....	712
12.2.1.1	Wärmeleitung.....	712
12.2.1.2	Konvektiver Wärmetransport.....	712
12.2.1.3	Wärmestrahlung.....	714
12.2.2	Wärmetauscher.....	714
12.2.2.1	Gleichstrom- und Gegenstrom-Wärmetauscher.....	714
12.2.2.2	Kreuzstromwärmetauscher.....	715
12.2.2.3	Berechnung der Wärmetauscherleistung.....	715
12.3	Komponenten des Kühlsystems.....	719
12.3.1	Wärmetauscherarten.....	719
12.3.1.1	Kühlmittelkühler.....	719
12.3.1.2	Ladeluftkühler.....	723
12.3.1.3	Motorölkühler.....	726
12.3.1.4	Getriebeölkühler.....	727
12.3.1.5	Hydraulikölkühler.....	727
12.3.1.6	Klimakondensatoren.....	727
12.3.1.7	Abgaswärmetauscher.....	728

12.3.2	Lüfter und Kühlmoduldurchströmung	730
12.3.2.1	Lüfterbauformen	730
12.3.2.2	Lüfterauslegung	731
12.3.2.3	Moduldurchströmung	732
12.3.3	Kühlmittelpumpe	733
12.3.4	Motorkühlkreislauf	733
12.3.5	Auslegung von Kühlsystemen	735
12.4	Durchströmung	736
12.4.1	Anordnung der Wärmetauscher	736
12.4.1.1	Positionen im Fahrzeug	736
12.4.1.2	Anordnung zu Kühlmodulen	737
12.4.2	Komponentenkühlung	738
12.4.3	Aerodynamik der Durchströmung	738
12.4.3.1	Strömungsform	738
12.4.3.2	Berechnung des Kühlluftmassenstroms	740
12.4.4	Auswirkungen auf die Gesamtfahrzeug-Aerodynamik	741
12.4.5	Systemoptimierung	744
12.4.5.1	Minimierung des Kühlluftmassenstroms	744
12.4.5.2	Anströmung und Lufteintritt	745
12.4.5.3	Luftführung und Kühlermatrix	746
12.4.5.4	Lüfter und Motorraum	748
12.4.5.5	Luftaustritt	750
12.5	Messungen in der Kühlluftströmung	751
12.6	Bezeichnungen	753

13 Heizung, Lüftung, Klimatisierung von Pkw

Holger Großmann

13.1	Randbedingungen	757
13.1.1	Einführung	757
13.1.2	Vorschriften, Richtlinien und Normen	757
13.2	Klimaphysiologie	758
13.2.1	Auf die Insassen einwirkende Größen	758
13.2.2	Behaglichkeitsmodell von P. O. FANGER	758
13.2.3	Mittlere Innenraumlufttemperatur	759
13.2.4	Luftgeschwindigkeit	760
13.2.5	Sonneneinstrahlung	761
13.2.6	Herzfrequenz	761
13.3	Auf den Pkw wirkende Größen	762
13.4	Luftstrom durch den Fahrgastraum	763
13.4.1	Zu- und Abluftöffnungen	763
13.4.2	Charakteristische Kurvenscharen	764
13.4.2.1	Gebälse	764
13.4.2.2	Leckagelinien i_w der Karosserie	765
13.4.2.3	Abluftlinien Av	766
13.4.2.4	Belüftungslinien B_{lp}	766
13.4.2.5	Belüftungsstrom	768
13.4.2.6	Belüftungsstrom bei geöffnetem Schiebe/Ausstelldach	768

13.4.3	Leckzuluft- und Leckabluftströme	769
13.4.3.1	Bedeutung des Leckzuluftstroms	769
13.4.3.2	Entstehung der Leckagelinie	769
13.4.3.3	Berechnung der Leckzuluft- und Leckabluftströme	770
13.4.3.3.1	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung durch Klassierung	771
13.4.3.3.2	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung aus gemessenen Leckagelinien	772
13.4.3.4	Leckzuluftstrom bei geschlossener Be- und Entlüftung	774
13.4.3.5	Beispiele	774
13.5	Wärmestrom durch den Fahrgastraum	775
13.5.1	Wärmedurchgang durch die Karosserie	776
13.5.2	Schnittstelle Heizungswärmetauscher/Fahrgastraum	778
13.5.2.1	Kennfeld des Wärmetauschers	778
13.5.2.2	Stationäre Innenraumlufttemperatur im Außenluftbetrieb.	779
13.5.2.3	Instationäre Innenraumlufttemperatur im Außenluftbetrieb....	781
13.5.2.4	Mittlere Innenraumlufttemperatur im Umluftbetrieb	781
13.5.2.5	Motor mit niedrigem Verbrauch	781
13.5.3	Schnittstelle Verdampfer/Fahrgastraum	783
13.5.3.1	Kennfeld des Verdampfers	783
13.5.3.2	Mittlere Innenraumlufttemperatur im Außenluftbetrieb.	786
13.5.3.3	Mittlere Innenraumlufttemperatur im Umluftbetrieb	787
13.5.3.4	Instationäre Abkühlung im Umluftbetrieb	788
13.5.4	Sonneneinstrahlung und Sommerluftaufheizung	788
13.5.4.1	Sonneneinstrahlung durch die Scheiben	788
13.5.4.2	Sonneneinstrahlung und die Karosserie	792
13.5.4.3	Aufheizung geparkter Pkw	792
13.5.4.4	Farbe der Lackierung	793
13.5.4.5	Material der Sitze	793
13.5.4.6	Vollständig weißer und schwarzer Pkw in der Sonne	793
13.5.4.7	Solarzellenbetrieebene Standbelüftung	794
13.5.4.8	Aufheizung bei Fahrt	794
13.6	Stofftransport	795
13.6.1	Wasserdampf	795
13.6.1.1	Beispiel: Heizung im Außenluftbetrieb	796
13.6.1.2	Beispiel: Heizung im Umluftbetrieb	796
13.6.1.3	Beispiel: Klimaanlage im Umluftbetrieb	796
13.6.2	Gaskonzentrationen im Fahrgastraum	796
13.6.3	Scheibenenteisung und Entfeuchtung	797
13.6.4	Filterung	798
13.7	Steuerungen und Regelungen	798
13.7.1	Temperatursteuerung der Heizung	798
13.7.2	Regelung der Verdampfer	799
13.7.3	Steuerung und Regelung der Luftverteilung und der Temperatur.	800
13.8	Ausgeführte Anlagen	800
13.8.1	Heizgeräte	800
13.8.2	Klimageräte	801
13.9	Bezeichnungen	803

14 Windkanäle*Wolf-Heinrich Hucho*

14.1	Aufgabenstellung.....	807
14.1.1	Anforderungen an einen Fahrzeugwindkanal.....	807
14.1.2	Simulation der Straßenfahrt.....	810
14.1.2.1	Stationär.....	810
14.1.2.2	Instationär.....	812
14.2	Auszüge aus der Windkanaltechnik.....	814
14.2.1	Literaturauswahl.....	814
14.2.2	Aufbau und Funktion.....	815
14.2.3	Eigenschaften der wesentlichen Komponenten.....	816
14.2.3.1	Bei der Versuchsplanung zu beachten.....	816
14.2.3.2	Die Düse.....	817
14.2.3.3	Die Messstrecke.....	823
14.2.3.4	Der Kollektor.....	830
14.2.3.5	Das Plenum.....	836
14.2.3.6	Wärmetauscher und Sonnenlichtsimulation.....	837
14.2.3.7	Ausrüstung.....	838
14.3	Messung der Windgeschwindigkeit.....	839
14.3.1	Kalibrierung eines Windkanals.....	839
14.3.2	Düsen- und Plenummethode.....	841
14.3.3	Ausführung der Messung und Korrektur der Geschwindigkeit.....	841
14.4	Defizite der Simulation.....	844
14.4.1	Idealisierung und systematische Fehler.....	844
14.4.2	Darstellung der Straße.....	845
14.4.3	Windkanalkorrekturen.....	863
14.4.3.1	Aufgabenstellung.....	863
14.4.3.2	Geschlossene Messstrecke.....	865
14.4.3.3	Offene Messstrecke.....	868
14.4.3.4	Grenzschicht auf dem Messstreckenboden.....	871
14.4.3.5	Schiebende Zuströmung.....	871
14.4.3.6	Thermische Versuche.....	872
14.5	Versuche mit verkleinerten Modellen.....	873
14.5.1	Vor- und Nachteile.....	873
14.5.2	Details zur Modelltechnik.....	874
14.5.3	Einfluss der Reynolds- und der Mach-Zahl.....	877
14.6	Ausgeführte Fahrzeugwindkanäle.....	885
14.6.1	Einteilung der Versuchsanlagen.....	885
14.6.2	Windkanäle für Fahrzeuge in natürlicher Größe.....	889
14.6.3	Modellwindkanäle.....	896
14.6.4	Klima- und Thermowindkanäle.....	898
14.6.5	Thermo- und Akustikblaskanäle.....	902
14.7	Vergleichsmessungen.....	903
14.8	Ausblick.....	906
14.9	Bezeichnungen.....	907

15 Mess- und Versuchstechnik*Görgün A. Necati, Wigbert Kohl*

15.1	Überblick.....	909
15.2	Messgeräte und Messwertaufnehmer.....	909
15.2.1	Messung aerodynamischer Kräfte und Momente.....	909
15.2.1.1	Windkanal-Waagen.....	909
15.2.1.2	Zerlegung der aerodynamischen Kräfte und Momente in ihre Komponenten.....	910
15.2.1.3	Messung der Stirnfläche.....	913
15.2.2	Druckmessungen.....	915
15.2.2.1	Dynamischer Druck.....	915
15.2.2.2	Statischer Druck.....	917
15.2.2.3	Messwertaufnehmer für Drücke.....	918
15.2.3	Messung der Strömungsgeschwindigkeit.....	923
15.2.3.1	Messung der Windgeschwindigkeit außerhalb und innerhalb des Testfahrzeuges.....	923
15.2.3.2	Bestimmung der Strahlgeschwindigkeit des Windkanals.....	930
15.2.3.3	Messung der Strömungsrichtung.....	932
15.2.4	Temperaturmessung.....	933
15.2.4.1	Temperatursensoren.....	933
15.2.4.2	Typische Messfehler bei Temperaturmessungen.....	936
15.2.5	Erfassung der Messdaten und Daten-Management.....	938
15.3	Messverfahren im Windkanal.....	940
15.3.1	Messung der aerodynamischen Koeffizienten.....	940
15.3.2	Air Flow Management.....	940
15.3.3	Messung des Luftdurchsatzes durch den Fahrgastraum.....	942
15.3.3.1	Luftdurchsatzmessung mit Hilfe von Austrittskennlinien - das Wirkdruckverfahren.....	943
15.3.3.2	Weitere Methoden zur Messung des Luftdurchsatzes durch den Fahrgastraum.....	945
15.3.4	Heizungs- und Klimatisierungstest.....	946
15.3.5	Entfrostsungs- und Entfeuchtungstest.....	948
15.3.6	Motorkühlungstest im Windkanal.....	950
15.3.7	Sichtbarmachung der Strömung.....	952
15.3.8	Windgeräuschmessung im Windkanal.....	954
15.3.8.1	Messungen im Fahrzeuginnenraum.....	955
15.3.8.1.1	Messungen mit Einzelmikrophonen.....	955
15.3.8.1.2	Kunstkopfmessstechnik.....	955
15.3.8.1.3	Schallintensitätsmesstechnik.....	956
15.3.8.2	Messung von Außengeräuschen.....	957
15.3.8.2.1	Intensitätsmessungen mit Spezialsonden.....	958
15.3.8.2.2	Mikrophon-Arrays.....	959
15.3.8.2.3	Akustische Holografie.....	961
15.3.8.2.4	Hohlspiegel-Mikrophone.....	964
15.3.8.3	Messung von lokalen Druckschwankungen in der Strömung.....	967
15.3.8.4	Körperschallmessungen.....	967
15.3.9	Versuche in Wasser.....	969

15.4	Messverfahren auf der Straße.....	972
15.4.1	Messung des Luftwiderstandes im Auslaufversuch.....	972
15.4.2	Seitenwindversuche.....	976
15.4.3	Motorkühlungstests auf der Straße.....	979
15.4.4	Verschmutzung von Glasflächen und Karosserieteilen.....	980
15.4.5	Windgeräusch-Messung auf der Straße.....	981
15.5	Bezeichnungen.....	982

16 Numerische Verfahren

Syed R. Ahmed, Ludger Lührmann

16.1	Pro und kontra Numerik.....	985
16.2	Merkmale der Fahrzeugumströmung.....	988
16.3	Anforderungen an CFD-Verfahren.....	988
16.4	CFD-Verfahren für die Fahrzeugaerodynamik.....	989
16.4.1	Allgemeine Bemerkungen.....	989
16.4.2	Die Navier-Stokes Bewegungsgleichungen für ein inkompressibles Medium.....	990
16.5	Probleme bei Anwendung von CFD-Verfahren.....	992
16.5.1	Gebot zur Vereinfachung.....	992
16.5.2	Klassifizierung der CFD-Verfahren.....	993
16.5.3	Ablauf einer Berechnung.....	994
16.5.4	Netzgenerierung.....	994
16.6	Beschreibung der CFD-Verfahren.....	999
16.6.1	Lineare Verfahren.....	999
16.6.2	Nichtlineare Verfahren.....	1003
16.6.2.1	Lösungsmethodik.....	1003
16.6.2.2	Zeitunabhängige Verfahren.....	1004
16.6.2.3	Turbulenzmodellierung für RANS-Verfahren.....	1006
16.7	Nichtlineare instationäre Verfahren.....	1010
16.7.1	Das instationäre RANS-Verfahren (URANS, VLES).....	1010
16.7.2	Large Eddy Simulation (LES).....	1010
16.7.2.1	Struktur der Turbulenz.....	1010
16.7.2.2	Filterung der NS-Gleichungen.....	1011
16.7.2.3	Netzverfeinerung bei LES-Verfahren.....	1013
16.7.2.4	Rechenaufwand bei LES-Verfahren.....	1013
16.7.3	Direkte numerische Simulation (DNS).....	1015
16.7.4	Lattice-Boltzmann-Verfahren.....	1016
16.7.5	Hybrid- und Zonalverfahren.....	1018
16.7.5.1	Detached Eddy Simulation (DES).....	1018
16.7.5.2	Zonal-Verfahren.....	1018
16.7.5.3	Zonal-Verfahren mit Nachlaufmodellierung.....	1019
16.7.6	Eindimensionale Verfahren.....	1022
16.7.6.1	Schrittweise Auslegung von Kühlsystemen.....	1022
16.7.6.2	Luftseite.....	1022
16.7.6.3	Flüssigkeitsseite.....	1026

16.8 CFD bei der Entwicklung von Automobilen - Vorgehensweise und
ausgewählte Beispiele.....1028

16.8.1 Bedingungen für den Einsatz von CFD.....1028

16.8.2 Integration von CFD in den Entwicklungsprozess.....1028

16.8.3 Prognosegüte.....1030

16.8.4 Drücke, Kräfte und Momente am Fahrzeug.....1032

16.8.5 Aufzeigen aerodynamischer Potenziale mittels CFD.....1033

16.8.6 Einfluss des Turbulenzmodells auf die Rechenergebnisse.....1036

16.8.7 Kühlluft für Komponenten.....1038

16.8.8 Aggregatekühlung.....1039

16.8.9 Klimatisierung.....1043

16.8.10 Aeroakustische Untersuchungen.....1045

16.9 Benötigte Computer.....1047

16.9.1 Bedarf an Rechenleistung und Entwicklungstendenz der
Supercomputer.....1047

16.9.2 Architektur der Supercomputer.....1049

16.10 Wertung und Ausblick.....1050

16.11 Bezeichnungen.....1051

Anhang

Literaturverzeichnis.....1053

Abkürzungen.....1102

Institute, Organisationen, Veranstaltungen.....1103

Die Autoren.....1107

Sachwortverzeichnis.....1112