

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	Lothar Krüger
Jürgen Bachmann	Manfred Lentzen
Bernward Bayer	Ludger Lührmann
Thorsten Frank	Alexander Mößner
Hans Götz	Görgün Necati
Holger Großmann	Ralf Neuendorf
Martin Helfer	Michael Pfadenhauer
Patrick Höfer	Jörg Rothhämel
Wolf-Heinrich Hucho	Oliver Schimpf
Dietrich Hummel	Frank Ullrich
Gerd Janke	Teddy Woll
Wigbert Kohl	Bernhard Zuck
Wolfgang Kramer	



ATZ/MTZ-Fachbuch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

Wolf-Heinrich Huchō

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 Huch

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 ^-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	Kühlluftströmung	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	Fahrstabilität.....	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

Patrick Höfer, Alexander Mößner

6.1	Lokale Strömungsmechanismen und deren Auswirkung.....	373
6.2	Strömungsstrukturen und deren Analyse.....	374
6.2.1	Strömungsfähnemene.....	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	Windgeräuschentstehung 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	
	<i>Martin Helfer</i>	
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	
	<i>Michael Pfadenhauer</i>	
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	Zukunftsansichten 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	C1 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 Umweltignalen	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 Kunstkopfmesstechnik.....	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	Gebläse.....	764
13.4.2.2	Leckagelinien i_w der Karosserie.....	765
13.4.2.3	AbluftlinienAv.....	766
13.4.2.4	Belüftungslinien B_w	766
13.4.2.5	Belüftungsstrom.....	768
13.4.2.6	Belüftungsstrom bei geöffnetem Schiebe/Ausstelldeckel.....	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	Solarzellenbetriebene 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 Huchō*

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 Einzelmikrofonen	955
15.3.8.1.2	Kunstkopfmesstechnik	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	Mikrofon-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