

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	
	<i>Wolf-Heinrich Hucho</i>	
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 A-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
5.7.4	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	Windgeräuschestehung 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 A-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	A-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	
	<i>Frank Ullrich, Bernward Bayer, Jürgen Bachmann</i>	
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	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 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 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	Optimieren des 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		
<i>Holger Großmann</i>		
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 L_w der Karosserie	765
13.4.2.3	Abluftlinien A_w	766
13.4.2.4	Belüftungslinien B_w	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	Solarzellenbetrie bene 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		
<i>Syed R. Ahmed, Ludger Lührmann</i>		
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