

# Inhalt

## 1 Einführung

*Wolf-Heinrich Hucho*

1.1	Abgrenzung des Themas .....	1
1.1.1	Grundzüge der Automobil-Aerodynamik .....	1
1.1.2	Eigenarten der Fahrzeug-Aerodynamik .....	7
1.1.3	Angrenzende Fachgebiete .....	10
1.2	Geschichtliche Entwicklung .....	13
1.2.1	Betrachtungsweise .....	13
1.2.2	„Entliehene“ Formen .....	15
1.2.3	Stromlinienformen .....	17
1.2.4	Parameter-Variationen .....	28
1.2.5	Einvolumen-Körper .....	32
1.2.6	Die Ponton-Karosserie .....	37
1.2.7	Nutzfahrzeuge .....	38
1.2.8	Motorräder .....	42
1.3	Gegenwart und zukünftige Trends .....	43
1.3.1	Stand der Technik .....	43
1.3.2	Detailoptimierung .....	45
1.3.3	Formoptimierung .....	47
1.3.4	Entwicklungsaufwand .....	49
1.4	Aerodynamik und Design .....	50
1.5	Bezeichnungen .....	57

## 2 Einige Grundzüge der Strömungsmechanik

*Dietrich Hummel*

2.1	Stoffeigenschaften inkompressibler Fluide .....	59
2.1.1	Dichte .....	59
2.1.2	Viskosität .....	59
2.1.3	Wärmeleitfähigkeit .....	60
2.2	Strömungsprobleme an Kraftfahrzeugen .....	60
2.2.1	Umströmung .....	60
2.2.2	Durchströmung .....	61
2.3	Umströmungsprobleme .....	62
2.3.1	Grundgleichungen für reibunglose, inkompressible Außenströmung .....	62
2.3.2	Anwendungsbeispiele .....	63
2.3.3	Reibungseinflüsse .....	65
2.3.3.1	Laminare und turbulente Grenzschichtausbildung .....	65
2.3.3.2	Ablösung .....	66
2.3.3.3	Reibungswiderstand .....	67
2.3.3.4	Druckwiderstand .....	69
2.3.3.5	Gesamtkräfte und -momente .....	72
2.3.3.6	Temperaturgrenzschichten .....	75
2.3.4	Sonderprobleme .....	78
2.3.4.1	Geräusche .....	78

2.3.4.2	Mehrkörperprobleme .....	79
2.3.4.3	Inhomogenitäten .....	82
2.4	Durchströmungsprobleme .....	84
2.4.1	Grundgleichungen für inkompressible Strömung.....	84
2.4.2	Anwendungsbeispiele .....	85
2.4.2.1	Laminare und turbulente Rohrströmung .....	85
2.4.2.2	Rohrkrümmer .....	87
2.4.2.3	Einlaufkanten .....	88
2.4.2.4	Örtliche Querschnittsverengungen .....	88
2.4.2.5	Querschnittserweiterungen .....	89
2.5	Zusammenwirken von Umströmung und Durchströmung bei Fahrzeugen .....	91
2.6	Bezeichnungen .....	92

### **3 Fahrleistungen von Pkw und Schnelltransportern**

*Hans-Joachim Emmelmann*

3.1	Zielsetzung .....	95
3.2	Fahrwiderstände .....	96
3.2.1	Fahrwiderstandsgleichung .....	96
3.2.2	Analyse der Fahrwiderstände .....	97
3.2.2.1	Luftwiderstand .....	97
3.2.2.2	Rollwiderstand .....	98
3.2.2.3	Steigungswiderstand .....	98
3.2.2.4	Beschleunigungswiderstand .....	100
3.3	Fahrleistungen .....	100
3.3.1	Zugkraftdiagramm .....	100
3.3.2	Beschleunigungszeiten und Elastizität .....	100
3.4	Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs .....	102
3.4.1	Vorgehensweise .....	102
3.4.2	Verbrauchskennfeld des Motors .....	102
3.4.3	Anpassung des Achsantriebes .....	103
3.4.4	Getriebeauslegung .....	106
3.4.5	Fahrzyklen .....	107
3.5	Kraftstoffverbrauch und Fahrleistungen .....	110
3.5.1	Vergleich von Luft- und Rollwiderstand .....	110
3.5.2	Höchstgeschwindigkeit .....	110
3.5.3	Szenario für Verbrauchsbetrachtungen .....	111
3.5.4	Kraftstoffersparnis durch Luftwiderstandsverringerung .....	113
3.5.5	Kraftstoffersparnis durch Verringerung des Gewichtes .....	114
3.5.6	Einfluß der installierten Antriebsleistung .....	115
3.5.7	Verbrauchsoptimales Fahrzeugkonzept .....	116
3.5.8	Kraftstoffverbrauch von Schnelltransportern .....	119
3.6	Ausblick .....	122
3.7	Bezeichnungen .....	123

## 4 Der Luftwiderstand von Personenwagen

*Wolf-Heinrich Huchō*

4.1	Einordnung des Pkw in die Reihe der übrigen Widerstandskörper .....	125
4.2	Strömungsfeld um einen Pkw .....	126
4.3	Analyse des Luftwiderstandes .....	136
4.3.1	Möglichkeiten der Betrachtung .....	136
4.3.2	Physikalische Mechanismen .....	136
4.3.3	Ort des Entstehens .....	138
4.3.4	Wirkung auf die Umgebung .....	140
4.3.5	Widerstand und Auftrieb .....	141
4.4	Teilwiderstände .....	145
4.4.1	Betrachtungsweise .....	145
4.4.2	Vorderwagen .....	146
4.4.3	Windschutzscheibe und A-Säule .....	150
4.4.4	Dach .....	153
4.4.5	Fahrzeugheck .....	154
4.4.5.1	Ablösungsformen .....	154
4.4.5.2	Boat-tailing .....	155
4.4.5.3	Schrägheck .....	158
4.4.5.4	Stufenheck .....	163
4.4.6	Grundriß und Seitenteile .....	166
4.4.7	Unterseite .....	167
4.4.8	Räder und Radhäuser .....	167
4.4.9	Bugspoiler .....	171
4.4.10	Heckspoiler .....	177
4.4.11	Anbauteile .....	180
4.4.12	Durchström-Widerstände .....	183
4.4.13	Pkw mit Anhänger .....	186
4.4.14	Konvoi-Fahren .....	191
4.5	Strategien für die Formentwicklung .....	193
4.5.1	Aufgabenstellung .....	193
4.5.2	Detail-Optimierung .....	194
4.5.3	Form-Optimierung .....	195
4.5.4	Face-Lift .....	197
4.5.5	Anbauteile .....	197
4.5.6	Prognose- und Expertensysteme .....	197
4.6	Widerstand von Serienfahrzeugen .....	201
4.6.1	Bewertung von Versuchsergebnissen .....	201
4.6.2	Ausstattung .....	201
4.6.3	Fahrzeuglage, Seitenwind .....	203
4.6.4	Widerstandsbeiwerte von Serienwagen .....	206
4.7	Forschung .....	207
4.7.1	Zielsetzung .....	207
4.7.2	Grundkörper .....	207
4.7.3	Konzeptfahrzeuge .....	210
4.7.4	Rekordfahrzeuge .....	214
4.8	Bezeichnungen .....	217

## 5 Richtungsstabilität

*Alfons Gilhaus, Ralf Hoffmann*

5.1	Einführung .....	219
5.2	Aerodynamik und Fahrstabilität - Geschichtliche Entwicklung .....	220
5.3	Luftkräfte und -momente .....	224
5.3.1	Entstehung .....	224
5.3.2	Aerodynamische Stabilität .....	227
5.3.3	Instationäre Kräfte und Momente .....	228
5.4	Aerodynamik und Fahrverhalten .....	230
5.4.1	Auftrieb und Geradeausfahrt .....	230
5.4.2	Kurvenfahrt .....	232
5.4.3	Lastwechselreaktion .....	237
5.4.4	Einfluß der Luftkräfte auf das Bremsverhalten .....	237
5.4.5	Fahrverhalten bei Seitenwind .....	242
5.4.5.1	Natürlicher Wind und Seitenwind .....	242
5.4.5.2	Seitenwindreaktionen .....	245
5.4.6	Überholvorgänge .....	253
5.4.7	Fahren mit Anhänger .....	257
5.5	Einfluß der Fahrzeugform auf die aerodynamischen Kräfte und Momente .....	259
5.5.1	Aerodynamische Eigenschaften der Grundformen .....	259
5.5.1.1	Auftrieb und Nickmoment .....	260
5.5.1.2	Seitenkraft und Giermoment .....	261
5.5.1.3	Rollmoment .....	267
5.5.1.4	Vergleich der wesentlichen Grundformen .....	268
5.5.2	Aerodynamische Effekte von Merkmalen realer Fahrzeuge .....	270
5.5.2.1	Kühlluftströmung .....	270
5.5.2.2	Fugen und Öffnungen .....	271
5.5.2.3	Außenspiegel .....	272
5.5.2.4	Räder, Reifen und Unterboden .....	273
5.5.3.	Aerodynamische Anbauteile .....	274
5.5.4	Dachlasten .....	276
5.6	Test- und Bewertungsmethoden .....	279
5.6.1	Messungen im Windkanal .....	279
5.6.2.	Fahrversuche .....	280
5.6.3	Fahrdynamische Berechnungen .....	284
5.6.4	Fahrtsimulator .....	285
5.7	Bezeichnungen .....	289

## 6 Funktion, Sicherheit und Komfort

*Raimund Piatek*

6.1	Differenzierte Betrachtung .....	291
6.2	Strömungsfeld um ein Fahrzeug .....	291
6.2.1	Strömungsformen .....	291
6.2.2	Druckverteilung .....	295
6.3	Kräfte auf Karosserieteile .....	298
6.4	Fahrzeugbenetzung und -verschmutzung .....	301
6.4.1	Sicherheit und Ästhetik .....	301

6.4.2	Wasserströmung .....	301
6.4.3	Schmutzablagerung .....	303
6.5	Windgeräusche .....	305
6.5.1	Grundlagen der Geräuschentwicklung an Fahrzeugen .....	305
6.5.2	Entstehung der Strömungsgeräusche .....	306
6.6	Umströmung von Einzelteilen .....	311
6.6.1	Scheibenwischer .....	311
6.6.2	Bremsen .....	312
6.7	Ausblick .....	313
6.8	Bezeichnungen .....	313

## **7 Hochleistungsfahrzeuge**

*Helmut Flegl, Michael Rauscher*

7.1	Einführung .....	315
7.2	Historische Meilensteine .....	319
7.3	Bedeutung der Aerodynamik für Hochleistungsfahrzeuge .....	330
7.3.1	Widerstand und Auftrieb .....	330
7.3.2	Fahrverhalten .....	331
7.3.2.1	Fahrversuche .....	331
7.3.2.2	Anstellwinkel und Schräganströmung .....	332
7.3.2.3	Windschattenfahrt .....	335
7.3.2.4	Theoretische Untersuchungen .....	336
7.3.3	Kühlung und Lüftung .....	338
7.4	Konstruktive Möglichkeiten .....	339
7.4.1	Widerstand und Auftrieb .....	339
7.4.1.1	Einfluß der Grundform .....	341
7.4.1.2	Flügel .....	341
7.4.1.3	Bodeneffekt .....	342
7.4.2	Fahreigenschaften .....	346
7.4.3	Kühlung und Lüftung .....	349
7.5	Besondere Fragestellungen .....	351
7.5.1	Rundenzeit und Kraftstoffverbrauch .....	351
7.5.2	Schallnahe Geschwindigkeiten .....	353
7.5.3	Freistehende Räder .....	354
7.5.4	Solarstromgetriebene Fahrzeuge .....	355
7.5.5	Entwicklungsmethoden und Simulationstechniken .....	356
7.6	Zukünftige Entwicklungen der Hochleistungsfahrzeuge .....	357
7.7	Bezeichnungen .....	359

## **8 Nutzfahrzeuge**

*Hans Götz*

8.1	Zielgruppe .....	361
8.2	Fahrwiderstände und Kraftstoffverbrauch .....	362
8.3	Auswirkung luftwiderstandsreduzierender Maßnahmen auf den Kraftstoffverbrauch ..	364
8.4	Luftwiderstandsbeiwerte verschiedener Nutzfahrzeuge .....	366
8.4.1	Symmetrische Anströmung .....	366

8.4.2	Schräganströmung .....	366
8.4.3	Windeinflüsse - Abgrenzung des Anströmwinkels .....	367
8.4.4	Charakterisierung des Luftwiderstandes im realen Fahrbetrieb .....	367
8.5	Beeinflussung des Luftwiderstandes .....	369
8.5.1	Spielraum für aerodynamische Maßnahmen bei Nutzfahrzeugen .....	369
8.5.2	Optimierung im Windkanal - Probleme der Modellmeßtechnik .....	370
8.5.3	Luftwiderstandsoptimierung beim Lkw .....	371
8.5.3.1	Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse .....	371
8.5.3.2	Teilwiderstände - Interferenzproblem .....	373
8.5.3.3	Fahrerhaus-Formgebung .....	374
8.5.3.4	Luftwiderstandsmindernde Anbauteile für Lkw .....	377
8.5.3.5	Lastzug-Anhänger .....	381
8.5.3.6	Aerodynamisch ausgelegte Sattelzugkonzepte .....	382
8.5.3.7	Aerodynamische Optimierungsmaßnahmen am Autotransporter .....	386
8.5.4	Luftwiderstandsoptimierung beim Omnibus und bei Schnelltransporter-Kastenwagen	387
8.5.4.1	Randbedingungen .....	387
8.5.4.2	Charakteristische Strömungsverhältnisse an einfachen geometrischen Körpern ....	387
8.5.4.3	Optimieren der Frontpartie .....	388
8.5.4.4	Optimieren des Heckbereichs .....	394
8.5.4.5	Anbauteile am Heck .....	396
8.5.4.6	Trends im Bus-Design .....	397
8.6	Aerodynamische Wechselwirkungen .....	398
8.6.1	Kolonnenbildung .....	398
8.6.2	Tunneldurchfahrt .....	399
8.7	Fahrzeugverschmutzung .....	404
8.7.1	Fremdverschmutzung .....	404
8.7.2	Eigenverschmutzung .....	406
8.7.2.1	Verringerung der Seitenwandverschmutzung beim Omnibus .....	406
8.7.2.2	Verringerung der Heckflächenverschmutzung .....	408
8.7.3	Verringerung der Lkw-Verschmutzung .....	411
8.7.4	Sprühwasserbeaufschlagung nachfolgender Fahrzeuge .....	412

## 9 Motorräder

*Bernward Bayer*

9.1.	Einleitung .....	417
9.2.	Überblick über die Entwicklung der Motorrad-Aerodynamik .....	418
9.2.1	Historie .....	418
9.2.2	Heutiger Stand der Technik .....	422
9.3	Fahrdynamik und ihr Bezug zur Aerodynamik .....	428
9.3.1	Fahrleistungen .....	428
9.3.2	Fahrstabilität .....	429
9.3.3	Seitenwindverhalten .....	431
9.3.4	Auftriebseffekte .....	432
9.3.5	Kurvenfahrt .....	435
9.4	Meßmethodik im Fahrversuch .....	436
9.5	Windkanalergebnisse .....	438
9.5.1	Messungen an Solomotorrädern .....	438
9.5.2	Fahrereinflüsse .....	444

9 5 2 1	Fahrer und Sozus	444
9 5 2 2	Bekleidung und Helm	446
9 5 3	Gespanne	449
9 6	Ausblick	450
9 7	Bezeichnungen	453

## 10 Motorkühlung

*Wulf Sebbeße, Peter Steinberg, Norbert Deußen, Dieter Schlenz*

10 1	Aufgabe des Kuhlsystems	455
10 1 1	Anforderungen zur Funktion	455
10 1 2	Anforderungen an passive Merkmale	455
10 1 3	Entwicklungspotential des Kuhlsystems	455
10 2	Kuhlsysteme	456
10 2 1	Wasserkühlung	456
10 2 2	Luftkühlung	458
10 2 3	Kühlung mit Bauteiltemperaturregelung	458
10 2 4	Zweikreiskuhlsystem und Warmlaufkonzept	459
10 2 5	Heißkühlung	460
10 2 6	Olkühlung	461
10 2 7	Phasen-Wechsel-Kühlung	462
10 3	Berechnungsverfahren	465
10 3 1	Grundlagen der Wärmeübertragung	465
10 3 1 1	Wärmeübergang und Strahlung	466
10 3 1 1 1	Wärmeübergang von Arbeitsgas zu den brennraumumgebenden Bauteilen	466
10 3 1 1 2	Wärmeübergang vom Zylinder zum Kühlmittel	466
10 3 1 1 3	Wärmeübergang an der Gehausewand	468
10 3 1 2	Wärmeleitung in Bauteilen	468
10 3 1 3	Berechnungsmodell und Simulationsergebnisse	469
10 3 2	Modulare Verfahren zur Dimensionierung von Kuhlsystemen	472
10 3 2 1	Konzeption des Verfahrens	472
10 3 2 2	Kühlmittelkreislauf	472
10 3 2 3	Lüfter und Lüfterkupplung	473
10 3 2 4	Kuhlluftsystem	474
10 3 2 5	Wärmebilanz an Motor und Motoroberfläche	474
10 3 2 6	Wärmebilanz am Kühler	475
10 3 2 7	Medienwärmetauschermessung am Vollmotor	475
10 4	Fahrzeuginnenstromung	478
10 4 1	Kuhlluftsystem	478
10 4 1 1	Auswirkung der Innenstromung auf die Fahrzeugaerodynamik	479
10 4 1 2	Aerodynamik der Innenstromung	480
10 4 1 3	Luftgeschwindigkeitsverteilung in der Kuhlerebene	483
10 4 2	Kühlmittelkuhler	487
10 4 3	Lüfter für Kühler	489
10 4 3 1	Aufgaben des Kühlerlüfters	489
10 4 3 2	Bauarten für Lüfter und Antrieb	489
10 4 3 3	Auslegungskriterien und Eigenschaften	491
10 4 3 3 1	Volumenstrom	491
10 4 3 3 2	Leistungsaufnahme und Wirkungsgrad	493

10.4.3.3.3	Geräuschentwicklung .....	496
10.4.3.3.4	Masse und Bauraum .....	497
10.5	Bezeichnungen .....	499
<b>11</b>	<b>Heizung, Lüftung, Klimatisierung von Pkw</b>	
<i>Holger Großmann</i>		
11.1	Definition der Aufgaben: Komfort und Sicherheit.....	503
11.2	Klimaphysiologie .....	503
11.2.1	Auf die Insassen wirkende Größen .....	503
11.2.2	Innenraumtemperatur.....	504
11.2.3	Temperaturschichtung .....	504
11.2.4	Luftgeschwindigkeit .....	504
11.2.5	Direktes Anblasen des Körpers .....	506
11.2.6	Luftfeuchtigkeit .....	506
11.2.7	Behaglichkeitsmodell von P. O. FANGER .....	506
11.2.8	Sonneneinstrahlung.....	507
11.2.9	Klimameßpuppen .....	507
11.3	Auf den Pkw wirkende Größen .....	507
11.4	Luftstrom durch den Fahrgastraum .....	508
11.4.1	Zu- und Abluftöffnungen .....	508
11.4.2	Definition der Luftströme .....	509
11.4.3	Meßmethoden von Luftströmen .....	509
11.4.4	Charakteristische Kurvenscharen .....	510
11.4.4.1	Gebläsekennlinien.....	510
11.4.4.2	Leckagelinien $L_w$ der Karosserie .....	511
11.4.4.3	Abluftlinien $A_w$ .....	511
11.4.4.4	Belüftungslinien $B_w$ .....	512
11.4.4.5	Belüftungsstrom .....	512
11.4.4.6	Belüftungsstrom bei geöffnetem Schiebe-Ausstellendach .....	514
11.4.5	Leckzuluftstrom .....	514
11.4.5.1	Bedeutung des Leckzuluftstroms .....	514
11.4.5.2	Berechnung der Leckzuluftströme .....	514
11.4.5.3	Leckzuluftstrom bei geschlossener Be- und Entlüftung .....	515
11.4.5.4	Beispiele.....	516
11.5	Wärmestrom durch den Fahrgastraum .....	517
11.5.1	Wärmedurchgang durch die Karosserie .....	517
11.5.2	Schnittstelle Heizungswärmetauscher/Innenraum .....	519
11.5.2.1	Kennfeld des Wärmetauschers .....	519
11.5.2.2	Stationäre Innenraumtemperatur im Frischluftbetrieb .....	520
11.5.2.3	Instationäre Innenraumtemperatur im Frischluftbetrieb .....	522
11.5.2.4	Mittlere Innenraumtemperatur im Umluftbetrieb .....	522
11.5.2.5	Motor mit niedrigem Verbrauch .....	523
11.5.3	Schnittstelle Verdampfer/Innenraum .....	525
11.5.3.1	Kennfeld des Verdampfers .....	525
11.5.3.2	Mittlere Innenraumtemperatur im Frischluftbetrieb .....	528
11.5.3.3	Innenraumtemperatur im Umluftbetrieb .....	528
11.5.3.4	Schnittstelle Verdampfer/Kältekreislauf .....	528
11.5.3.5	Instationäre Abkühlung im Umluftbetrieb .....	530

11 5 4	Sonneneinstrahlung und Sommerluftaufheizung	531
11 5 4 1	Sonneneinstrahlung durch die Scheibe	531
11 5 4 2	Aufheizung geparkter Pkw	531
11 5 4 3	Solarzellenbetriebene Standbelüftung	532
11 5 4 4	Aufheizung bei Fahrt	532
11 6	Stofftransport	534
11 6 1	Wasserdampf	534
11 6 2	Gaskonzentrationen im Fahrgastrraum	534
11 6 3	Scheibenenteisung und Entfeuchtung	535
11 6 4	Filterung	536
11 7	Steuerungen und Regelungen	536
11 7 1	Temperatursteuerung der Heizung	536
11 7 2	Regelung der Verdampfer	537
11 7 3	Steuerung der Luftverteilung und der Temperatur	537
11 8	Ausgeföhrte Anlagen	537
11 8 1	Luftgesteuertes Heizgerät	537
11 8 2	Wassergesteuertes Heizgerät	538
11 8 3	Integrierte Klimaanlagen	539
11 9	Bezeichnungen	540

## 12 Windkanäle

*Wolf-Heinrich Hucho*

12 1	Aufgabenstellung	543
12 1 1	Anforderungen an einen Fahrzeug-Windkanal	543
12 1 2	Simulation der Straßenfahrt	545
12 2	Auszüge aus der Windkanaltechnik	547
12 2 1	Literaturauswahl	547
12 2 2	Aufbau und Funktion	547
12 2 3	Eigenschaften der wesentlichen Komponenten	549
12 2 4	Ausrüstung	559
12 3	Einschränkungen bei der Simulation	559
12 3 1	Idealisierung und systematische Fehler	559
12 3 2	Fahrbahndarstellung	560
12 3 3	Windkanalkorrekturén	573
12 4	Versuche mit verkleinerten Modellen	576
12 4 1	Vor- und Nachteile	576
12 4 2	Details zur Modelltechnik	577
12 4 3	Einfluß der Reynolds-Zahl	582
12 5	Ausgeföhrte Fahrzeug-Windkanale	589
12 5 1	Einteilung der Versuchsanlagen	589
12 5 2	Windkanale für Fahrzeuge in natürlicher Größe	592
12 5 3	Modellwindkanale	596
12 5 4	Klimakanale	597
12 5 5	Blaskanale	599
12 6	Windkanal-Vergleichsmessungen	600
12 7	Ausblick	602
12 8	Bezeichnungen	604

## **13 Meß- und Versuchstechnik**

*Görgün A. Necati*

13.1	Einleitung .....	605
13.2	Meßgeräte und Meßwertaufnehmer .....	605
13.2.1	Messung aerodynamischer Kräfte und Momente .....	605
13.2.1.1	Windkanal-Waagen .....	605
13.2.1.2	Zerlegung der aerodynamischen Kräfte und Momente in ihre Komponenten ....	606
13.2.1.3	Messung der Stirnfläche .....	608
13.2.2	Druckmessungen.....	610
13.2.2.1	Druckmeßsonden .....	610
13.2.2.2	Meßwertaufnehmer für Drücke .....	612
13.2.3	Messung der Strömungsgeschwindigkeit .....	614
13.2.3.1	Messung der Windgeschwindigkeit außerhalb und innerhalb des Testfahrzeuges ....	614
13.2.3.2	Bestimmung der Strahlgeschwindigkeit des Windkanals .....	616
13.2.3.3	Messung der Strömungsrichtung .....	618
13.2.4	Temperaturmessung .....	619
13.2.4.1	Temperatursensoren .....	619
13.2.4.2	Typische Meßfehler bei Temperaturmessungen .....	622
13.2.5	Meßdatenerfassung und Daten-Management .....	624
13.3	Meßverfahren im Windkanal .....	625
13.3.1	Messung der aerodynamischen Koeffizienten .....	625
13.3.2	Air-Flow-Management-Versuche .....	625
13.3.3	Messung des Luftdurchsatzes durch den Fahrgastraum .....	626
13.3.3.1	Luftdurchsatzmessung mit Hilfe von „Austrittskennlinien“ - das Wirkdruckverfahren	626
13.3.3.2	Weitere Methoden zur Messung des Luftdurchsatzes durch den Fahrgastraum	629
13.3.4	Fahrgastraum-Heizungs- und -Klimatisierungstests .....	629
13.3.5	Entfeuchtungs- und Entfrostungstests .....	631
13.3.6	Motorkühlungstest im Windkanal .....	632
13.3.7	Techniken zur Sichtbarmachung der Strömung .....	634
13.3.8	Windgeräuschmessung im Windkanal .....	635
13.3.9	Versuche im Wasserbassin .....	638
13.4	Meßverfahren auf der Straße .....	639
13.4.1	Messung des Luftwiderstandes im Auslaufversuch .....	639
13.4.2	Seitenwindversuche .....	641
13.4.3	Motorkühlungstests auf der Straße .....	643
13.4.4	Verschmutzung von Glasflächen und Karosserieteilen .....	644
13.4.5	Windgeräuschmessung auf der Straße .....	645
13.5	Bezeichnungen .....	646

## **14 Numerische Verfahren**

*Syed R. Ahmed*

14.1	Einleitung .....	647
14.2	Merkmale einer Fahrzeugströmung .....	648
14.3	Anforderungen an CFD .....	649
14.4	CFD-Verfahren für die Fahrzeug-Aerodynamik .....	649
14.4.1	Allgemeine Bemerkungen .....	649
14.4.2	Methodik bei den Berechnungsverfahren .....	651

14.4.3	Netzgenerierung .....	652
14.4.4	Lineare CFD-Verfahren .....	655
14.4.4.1	Panelverfahren .....	655
14.4.4.2	Anwendungsbeispiele des Panelverfahrens .....	658
14.4.5	Nichtlineare CFD-Verfahren .....	662
14.4.5.1	Lösungsmethodik für nichtlineare Verfahren .....	662
14.4.5.2	Euler-Verfahren .....	665
14.4.5.3	Navier-Stokes-Verfahren mit zeitlich gemittelten Reibungstermen .....	666
14.4.5.3.1	Modellierung der Turbulenz und das $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell .....	667
14.4.5.3.2	Anwendungsbeispiele der RANS -Verfahren .....	669
14.4.5.4	Zeitabhängige Navier-Stokes -Verfahren .....	681
14.4.6	Hybrid-Verfahren .....	688
14.6	Bedarf an Rechenleistung und zukünftige Entwicklungstendenz der Supercomputer ...	691
14.7	Wertung und Ausblick .....	694
14.8	Bezeichnungen .....	696
	<b>Abkürzungen .....</b>	697
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	699
	<b>Sachwörterverzeichnis .....</b>	733
	<b>Namenverzeichnis .....</b>	743
	<b>Die Autoren .....</b>	749