

· größer werdenden
Komponenten oder
ien bietet die regel-
rderlichen Grund-
ert zusammenstellt.
e, die Nachschlage-
hen müssen und an
Kraftfahrzeug- und
indnis wie auch die
er Automobil- und

Thomas Schütz
Herausgeber

Hucho – Aerodynamik des Automobils

Strömungsmechanik, Wärmetechnik,
Fahrodynamik, Komfort

6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1171 Abbildungen und 49 Tabellen

 Springer Vieweg

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	Wolf-Heinrich Hucho	
1.1	Aufgabenstellung	1
1.1.1	Zielgrößen	1
1.1.2	Charakterisierung der Fahrzeugaerodynamik	2
1.1.3	Angrenzende Fachgebiete	5
1.2	Entwicklung der Fahrzeugaerodynamik	7
1.2.1	Literatur	7
1.2.2	Der Zeit voraus	7
1.2.3	Leitgröße c_w	10
1.2.4	Formfindung für den Pkw	11
1.2.5	„Entlehene“ Formen	12
1.2.6	Stromlinien	14
1.2.7	Erste Parameterstudien	23
1.3	Von der Kutsche zum Automobil	24
1.3.1	Tiefziehen	24
1.3.2	Ponton-Karosserie	25
1.3.3	Einvolumen-Körper	28
1.4	Heckformen	32
1.4.1	Kamm-Heck	32
1.4.2	Schrägheck	34
1.4.3	Stufenheck	36
1.4.4	Vollheck	36
1.5	Richtungsstabilität	37
1.6	Nutzfahrzeuge	39
1.7	Motorräder und Schutzhelm	43
1.8	Innere Strömungen	44
1.8.1	Motorraum	44
1.8.2	Fahrgastraum	45
1.9	Entwicklungsstrategien	46
1.9.1	Detailoptimierung	46
1.9.2	Formoptimierung	48
1.9.3	Grenzwert	53
1.10	Design und Aerodynamik	55
1.11	Werkzeuge für die Entwicklung	58
1.11.1	Windkanäle	58
1.11.2	Rating	59
1.11.3	Klassischer Weg	63

1.1.4	Ganzheitliche Verfahren	64
2	Physikalische Grundlagen der Aerodynamik	69
	Andreas Dillmann	
2.1	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	69
2.1.1	Erhaltungssätze	69
2.1.2	Kinematik und Dynamik von Strömungsfeldern	69
2.1.3	Die Kontinuitätsgleichung	74
2.1.4	Die Euler-Gleichung	75
2.1.5	Die Bernoulli-Gleichung	76
2.1.6	Potentialtheorie	77
2.1.7	Die Navier-Stokes-Gleichung	78
2.1.8	Integralformen der Erhaltungssätze	81
2.2	Dynamik der reibungsfreien Strömung	85
2.2.1	Zur Interpretation von Stromlinienbildern	85
2.2.2	Ebene Modellströmungen	87
2.2.3	Wirbelströmungen	96
2.3	Dynamik der reibungsbehafteten Strömung	101
2.3.1	Die Reynolds-Zahl	101
2.3.2	Das Prandtl'sche Grenzschichtkonzept	102
2.3.3	Grenzschichtablösung	105
2.3.4	Grenzschichtturbulenz	108
2.3.5	Widerstand einfacher Körper	111
2.3.6	Mehrkörpersysteme	118
2.3.7	Durchströmte Leitungssysteme	120
2.4	Anhang	132
2.4.1	Dichte und Viskosität von Luft	132
2.4.2	Kompressibilitätseinflüsse	133
3	Verbrauch und Fahrleistungen	137
	Teddy Woll	
3.1	Stellenwert des Luftwiderstandes	137
3.2	Theorie der Fahrwiderstände	140
3.2.1	Rollwiderstand	140
3.2.2	Luftwiderstand	141
3.2.3	Hangabtriebskräfte	143
3.2.4	Beschleunigungskräfte	143
3.2.5	Gesamt-Fahrwiderstand	144
3.2.6	Beispiel	144
3.3	Fahrleistungen	145
3.3.1	Beschleunigung und Elastizität	145
3.3.2	Steigfähigkeit	147
3.3.3	Höchstgeschwindigkeit	147
3.4	Verbrauch	149
3.4.1	Berechnung des Kraftstoffverbrauchs	150
3.4.2	Verbrauchsmessung und CO ₂ - und Energieäquivalente	152
3.5	Fahrzyklen	155
3.5.1	Historie	155
3.5.2	Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)	155

3.5.3	NEFZ
3.5.4	US-A
3.5.5	Asiat
3.5.6	WLT
3.5.7	Reale
3.6	Möglichkeiten
3.6.1	Ener
3.6.2	Moto
3.6.3	Nebe
3.6.4	Getri
3.6.5	Fahr
3.6.6	Rollw
3.6.7	Luftw
3.7	Luftwiderstar
3.7.1	Mögl
3.7.2	Gewi
3.7.3	Amo
3.8	Verbrauchsg
3.8.1	Gese
3.8.2	CO ₂
3.8.3	Gese
3.8.4	CO ₂
3.8.5	Gese
4	Luftkräfte und der
	Thomas Schütz, Lo
4.1	Luftkräfte un
4.2	Strömungspl
4.2.1	Totw
4.2.2	Läng
4.2.3	Duro
4.2.4	Umg
4.2.5	Einfl
4.3	Analyse der
4.3.1	Druc
4.3.2	Micr
4.3.3	Anal
4.4	Übrige Kom
4.4.1	Auft
4.4.2	Seite
4.4.3	Roll
4.5	Beeinflussun
4.5.1	Einfl
4.5.2	Kühl
4.5.3	Anb
4.5.4	Inter
4.6	Der aerodyn
4.6.1	Ziel
4.6.2	Proj

64	3.5.3	NEFZ-Zyklus für hybride Antriebe	156
69	3.5.4	US-Amerikanische Zyklen	157
69	3.5.5	Asiatische Zyklen	158
69	3.5.6	WLTP – Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure	159
69	3.5.7	Reale Zyklen	160
69	3.6	Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung	160
74	3.6.1	Energieflussdiagramm	160
75	3.6.2	Motorwirkungsgrad und -kennfelder	162
76	3.6.3	Nebenaggregate	163
77	3.6.4	Getriebe	164
78	3.6.5	Fahrzeugmasse	166
81	3.6.6	Rollwiderstand	167
85	3.6.7	Luftwiderstand	167
85	3.7	Luftwiderstandsreduzierung	168
87	3.7.1	Möglichkeiten zur Widerstandsreduktion	169
96	3.7.2	Gewichtsäquivalent	169
101	3.7.3	Amortisationsbetrachtung	170
101	3.8	Verbrauchsgesetze und Labels	171
102	3.8.1	Gesetze in der EU	172
105	3.8.2	CO ₂ -Labels in der EU	173
108	3.8.3	Gesetze in USA	173
111	3.8.4	CO ₂ -Labels in den USA	175
118	3.8.5	Gesetze in Asien	176
120	4	Luftkräfte und deren Beeinflussung an Personenkraftwagen	177
132		Thomas Schütz, Lothar Krüger und Manfred Lentzen	
132	4.1	Luftkräfte und deren Beiwerte	180
133	4.2	Strömungsphänomene an Pkw	186
137	4.2.1	Totwasser	187
137	4.2.2	Längswirbel	192
140	4.2.3	Durchströmung	194
140	4.2.4	Umgebungseinflüsse	196
141	4.2.5	Einfluss der Reynolds-Zahl	197
143	4.3	Analyse der Anteile am Luftwiderstand	198
143	4.3.1	Druck- und Reibungswiderstand	199
144	4.3.2	Micro-Drag	201
144	4.3.3	Analyse nach Einzelanteilen	203
145	4.4	Übrige Komponenten von Luftkraft und -moment	223
145	4.4.1	Auftrieb und Nickmoment	223
147	4.4.2	Seitenkraft und Giermoment	224
147	4.4.3	Rollmoment	226
149	4.5	Beeinflussung der Luftkräfte	227
150	4.5.1	Einfluss der Grundform	228
152	4.5.2	Kühlufteinfluss	294
155	4.5.3	Anbauteile	307
155	4.5.4	Interferenz	337
155	4.6	Der aerodynamische Entwicklungsprozess	353
155	4.6.1	Zieldefinition	354
155	4.6.2	Projektmeilensteine und Werkzeuge	355

4.6.3	Beispiele	360
4.7	Widerstand und Auftrieb von Serienfahrzeugen	362
4.7.1	Wettbewerbsübersicht nach Fahrzeugklassen	362
4.7.2	Widerstandsfläche $c_W \times A_x$	363
4.7.3	Ringvergleich nach EADE	364
4.7.4	Einfluss der Fahrzeugkonzepte	366
4.7.5	Einfluss von Ausstattung und Motorisierung	370
4.7.6	An der Decke fahren?	372
4.8	Zukünftige Entwicklung	373
4.9	Referenzgeometrien	377
4.9.1	Der SAE-Referenzkörper	377
4.9.2	Der Ahmed-Körper	379
4.9.3	Der DrivAer-Körper	380
5	Aerodynamik und Fahrstabilität	383
	David Schröck und Andreas Wagner	
5.1	Instationäre aerodynamische Kräfte und Momente	384
5.1.1	Überholvorgänge	384
5.1.2	Seitenwind	386
5.2	Fahrdynamische Auswirkungen	415
5.2.1	Einspurmodell	415
5.2.2	Auftriebsverhalten	419
5.2.3	Auslegung der aerodynamischen Achsentlastungen	428
5.2.4	Seitenwindverhalten	429
6	Funktion, Sicherheit und Komfort	441
	Patrick Höfer und Alexander Mößner	
6.1	Bauteilbelastung	442
6.1.1	Bauteillasten und deren Bestimmung	442
6.1.2	Türen, Klappen und Außenspiegel	442
6.1.3	Scheibenwischer	446
6.2	Komfort bei offenem Fahren	452
6.2.1	Zielsetzung	452
6.2.2	Strömung bei geöffnetem Verdeck	453
6.2.3	Windgeräuschestehung bei Cabriolets	453
6.2.4	Thermischer Komfort	454
6.2.5	Konstruktive Lösungen – Cabriolets	459
6.2.6	Konstruktive Lösungen – Schiebedächer	463
6.3	Schmutzfreihaltung	464
6.3.1	Grundlagen der Schmutzfreihaltung	464
6.3.2	Fremdverschmutzung	469
6.3.3	Eigenverschmutzung	481
7	Kühlung und Durchströmung	485
	Ralf Neuendorf und Bernhard Zuck	
7.1	Anforderungen an die Kühlung	485
7.1.1	Repräsentative Betriebszustände	486
7.1.2	Komponenten und Systeme	486
7.1.3	Weitere Anforderungen	489

7.2	Kühlsystem
7.2.1	Motor
7.2.2	Grund
7.2.3	Wärm
7.2.4	Wärm
7.3	Durchströmu
7.3.1	Betrie
7.3.2	Kühlr
7.3.3	Lüfter
7.4	Optimierung
7.4.1	Berec
7.4.2	Einflu
7.4.3	Luftel
7.4.4	Kühle
7.4.5	Lüfter
7.4.6	Moto
7.4.7	Luftau
7.5	Messtechnik f
7.5.1	Flügel
7.5.2	Druck
7.5.3	Optis
7.5.4	Hitzd
8	Umströmungsgerät
	Martin Helfer
8.1	Bedeutung de
	von Kraftfahr
8.2	Aeroakustisch
8.3	Aeroakustisch
8.3.1	Aeroa
8.3.2	Messu
8.3.3	Messu
8.3.4	Messu
8.3.5	Schall
8.4	Hauptgeräusc
8.4.1	Lecka
8.4.2	Außer
8.4.3	Schei
8.4.4	Anter
8.4.5	A-Säu
8.4.6	Hohlh
8.4.7	Schiel
8.4.8	Radh
8.4.9	Unter
8.4.10	Innen
	spezic
8.4.11	Cabri
8.5	Psychoakustis
8.5.1	Bewe

360	7.2	Kühlsystem	490
362	7.2.1	Motorkühlkreislauf	490
362	7.2.2	Grundlagen der Wärmeübertragung	491
363	7.2.3	Wärmetauscher Bauarten	493
364	7.2.4	Wärmetauscher im Fahrzeug	495
366	7.3	Durchströmung	498
370	7.3.1	Betriebspunkte	498
372	7.3.2	Kühlmodul	500
373	7.3.3	Lüfter	501
377	7.4	Optimierung Gesamtsystem	503
377	7.4.1	Berechnung des Kühlluftmassenstroms	503
379	7.4.2	Einflussparameter der Durchströmung	507
380	7.4.3	Luftintritte und Kühlluftführung	509
383	7.4.4	Kühlermatrix	510
384	7.4.5	Lüfter	513
384	7.4.6	Motorraum	515
386	7.4.7	Luftaustritte	517
415	7.5	Messtechnik für Kühlluftströmung	518
415	7.5.1	Flügelradanemometer	519
419	7.5.2	Druckmessungen	519
428	7.5.3	Optische Messmethoden	520
429	7.5.4	Hitzdraht-Anemometrie	520
441	8	Umströmungsgeräusche	523
442		Martin Helfer	
442	8.1	Bedeutung der Umströmungsgeräusche für das Innen- und Außengeräusch von Kraftfahrzeugen	523
446	8.2	Aeroakustische Geräuschenstehung	526
452	8.3	Aeroakustische Messtechnik	528
452	8.3.1	Aeroakustische Windkanäle	528
453	8.3.2	Messung von Innengeräuschen	528
453	8.3.3	Messung von Außengeräuschen	529
454	8.3.4	Messung von Körperschall	534
459	8.3.5	Schallquellenortung mit Hilfe von Spezialinstrumenten	534
463	8.4	Hauptgeräuschquellen und Minderungsmöglichkeiten	535
464	8.4.1	Leckagen	535
464	8.4.2	Außenspiegel	536
469	8.4.3	Scheibenwischer	538
481	8.4.4	Antennen	538
485	8.4.5	A-Säule	539
485	8.4.6	Hohlraumresonanzen	540
486	8.4.7	Schiebedach-Öffnungsgeräusche	542
486	8.4.8	Radhäuser	542
489	8.4.9	Unterboden	543
	8.4.10	Innengeräusch-Reduzierung durch Verwendung spezieller Akustikscheiben	543
	8.4.11	Cabrios	544
	8.5	Psychoakustische Gesichtspunkte	545
	8.5.1	Bewertung des unterschiedlichen Verhaltens bei Schräganströmung	547

8.5.2	Simulation mit Hilfe statischer Wirbelerzeuger	548
8.5.3	Simulation mit Hilfe dynamischer Wirbelerzeuger	548
8.5.4	Geräuschsynthese	549
9	Hochleistungsfahrzeuge	551
	Michael Pfadenhauer	
9.1	Einführung	551
9.1.1	Definition	551
9.1.2	Kleine Vorschau	552
9.2	Auszug aus der Geschichte	552
9.2.1	Rennwagen	552
9.2.2	Rekordfahrzeuge	559
9.2.3	Sportwagen	567
9.3	Fahrzeugklassen	571
9.4	Rennstrecken	578
9.5	Reglements	580
9.6	Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahreigenschaften	583
9.6.1	Luftwiderstand	583
9.6.2	Abtrieb	587
9.6.3	Balance	590
9.6.4	Fahrverhalten	595
9.6.5	Effizienz	597
9.6.6	Kühlung- und Belüftung	600
9.6.7	Schräganströmung	602
9.6.8	Windschatten	605
9.7	Aerodynamik der Bauteile	607
9.7.1	Grundkörper	607
9.7.2	Flügel	611
9.7.3	Spoiler und Gurneys	620
9.7.4	Bodeneffekt	626
9.7.5	Diffusoren	630
9.7.6	Ein- und Auslässe	638
9.7.7	Luftleitelemente	645
9.7.8	Räder	647
10	Nutzfahrzeuge	651
	Stephan Kopp und Thorsten Frank	
10.1	Zielgruppe	651
10.2	Fahrwiderstände & Kraftstoffverbrauch	653
10.3	Historie der Nutzfahrzeugaerodynamik	657
10.4	Grundlagen der Nutzfahrzeugaerodynamik	659
10.4.1	Gerad-/Schräganströmung	660
10.4.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen	663
10.5	Werkzeuge der Nfz-Aerodynamik	665
10.5.1	Herausforderungen beim Nfz	665
10.5.2	Modellwindkanal	665
10.5.3	Großwindkanal	669
10.5.4	CFD Simulation	672
10.5.5	Fahrversuche mit Radnabenmesseinrichtung	672

10.6	Luftwiderstands
10.6.1	Charakt
10.6.2	Fahrerha
10.6.3	Spiegel u
10.6.4	Motorra
10.6.5	Chassis
10.6.6	Aufliege
10.6.7	Konzept
10.7	Luftwiderstands
10.7.1	Charakt
10.7.2	Front .
10.7.3	Rückspi
10.7.4	Scheibe
10.7.5	Unterbo
10.7.6	Räder u
10.7.7	Motorra
10.7.8	Heck .
10.8	Aerodynamisch
10.8.1	Kolonne
10.8.2	Umstur
10.8.3	Aerodyn
10.8.4	Staubau
10.8.5	Warmlu
10.8.6	Abgasm
10.9	Fahrzeugversch
10.9.1	Aufgabe
10.9.2	Fremdv
10.9.3	Eigenve
11	Motorradaerodynam
	Norbert Grün, Holger
11.1	Einleitung . . .
11.2	Historischer Rü
11.2.1	Historie
11.2.2	Heutige
11.2.3	Sonderf
11.3	Aufgaben der A
11.3.1	Aerodyn
11.3.2	Aerodyn
11.3.3	Aerodyn
11.3.4	Kühlun
11.3.5	Wind- u
11.3.6	Aeroak
11.4	Entwicklungs
11.4.1	Der Ent
11.4.2	Simulat
11.4.3	Windka
11.4.4	Fahrver
11.4.5	Ausblic

548			
548			
549			
551			
551			
551			
552			
552			
552			
559			
567			
571			
578			
580			
583			
583			
587			
590			
595			
597			
600			
602			
605			
607			
607			
611			
620			
626			
630			
638			
645			
647			
651			
651			
653			
657			
659			
660			
663			
665			
665			
665			
669			
672			
672			
	10.6	Luftwiderstandsoptimierung beim Lkw	675
	10.6.1	Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse	675
	10.6.2	Fahrerhaus	677
	10.6.3	Spiegel und Anbauteile am Fahrerhaus	684
	10.6.4	Motorraumdurchströmung	686
	10.6.5	Chassis	688
	10.6.6	Auflieger & Aufbau	693
	10.6.7	Konzeptfahrzeuge	703
	10.7	Luftwiderstandsoptimierung beim Omnibus	704
	10.7.1	Charakteristische Strömungs- und Druckverhältnisse	705
	10.7.2	Front	706
	10.7.3	Rückspiegel	707
	10.7.4	Scheibenwischer	708
	10.7.5	Unterboden	711
	10.7.6	Räder u. Radabdeckungen	711
	10.7.7	Motorraumdurchströmung	713
	10.7.8	Heck	715
	10.8	Aerodynamische Wechselwirkungen	715
	10.8.1	Kolonnenfahrt	715
	10.8.2	Umsturz und Seitenwindempfindlichkeit	716
	10.8.3	Aerodynamische Lasten auf Bauteile	718
	10.8.4	Staubaufwirbelung	718
	10.8.5	Warmluftansaugung	719
	10.8.6	Abgasmanagement	719
	10.9	Fahrzeugverschmutzung	720
	10.9.1	Aufgabenstellung & Untersuchungsmethoden	720
	10.9.2	Fremdverschmutzung	723
	10.9.3	Eigenverschmutzung	723
	11	Motorradaerodynamik	727
		Norbert Grün, Holger Winkelmann, Frank Ullrich und Jürgen Bachmann	
	11.1	Einleitung	727
	11.2	Historischer Rückblick und heutige Motorrad-Bauformen	728
	11.2.1	Historie der Motorradaerodynamik	728
	11.2.2	Heutige Bauformen und Kategorien	732
	11.2.3	Sonderbauformen	737
	11.3	Aufgaben der Aerodynamik	741
	11.3.1	Aerodynamische Kräfte und Momente	741
	11.3.2	Aerodynamik und Längsdynamik	743
	11.3.3	Aerodynamik und Querdynamik	750
	11.3.4	Kühlung und Durchströmung	758
	11.3.5	Wind- und Wetterschutz	761
	11.3.6	Aeroakustik	763
	11.4	Entwicklungsmethoden	763
	11.4.1	Der Entwicklungsprozess	763
	11.4.2	Simulation (CFD)	765
	11.4.3	Windkanal	776
	11.4.4	Fahrversuch	785
	11.4.5	Ausblick - Weiterentwicklung der Entwicklungsmethoden	788

11.5	Aerodynamische Gestaltung, Beispiele aus der Praxis	790
11.5.1	Maßnahmen der aerodynamischen Gestaltung für Widerstand und Auftrieb	790
11.5.2	Gestaltung von Durchströmung, Kühlung und Hitzeschutz	793
11.5.3	Maßnahmen für Wind- und Wetterschutz	795
11.6	Ausblick	796
12	Schutzhelme	799
	Gerd Janke und Sebastian Reitebuch	
12.1	Schutzfunktion und Aufbau	799
12.2	Motorradhelme	801
12.2.1	Aerodynamik	801
12.2.2	Aeroakustik	806
12.2.3	Belüftung und Regentests	815
12.3	Helme für offene Rennfahrzeuge	819
12.3.1	Geschichtliches	819
12.3.2	Aerodynamik und Belüftung	820
12.3.3	Akustik	822
12.4	Mess- und Simulationstechnik	824
12.4.1	Abgrenzung	824
12.4.2	Windkanal	824
12.4.3	Aerodynamische Kräfte	824
12.4.4	Aeroakustik und Kunstkopfmessstechnik	827
12.4.5	Numerische Berechnungen der Strömung (CFD)	827
13	Windkanäle und Messtechnik	831
	Reinhard Blumrich, Edzard Mercker, Armin Michelbach, Jorg-Dieter Vagt, Nils Widdecke und Jochen Wiedemann	
13.1	Aufgabenstellung	831
13.2	Windkanalphysik	833
13.2.1	Aufbau und Funktion von Windkanälen	833
13.2.2	Windkanaldüse	836
13.2.3	Die Messstrecke	842
13.2.4	Der Kollektor	849
13.2.5	Die Plenumshalle	852
13.2.6	Diffusoren	854
13.2.7	Umlenkecken	855
13.2.8	Siebe	855
13.2.9	Gleichrichter	856
13.2.10	Akustische und Anti-Wummer-Maßnahmen	856
13.2.11	Bodensimulation	868
13.2.12	Instationäre Strömungen und Böensimulation	876
13.2.13	Windkanalkorrekturen	879
13.3	Messungen in Windkanälen	891
13.3.1	Versuchsablauf	891
13.3.2	Messung der Strömungsgeschwindigkeit	893
13.3.3	Druckmessungen	900
13.3.4	Messung aerodynamischer Kräfte und Momente	906
13.3.5	Sichtbarmachen der Strömung	913

13.3.6	Unte
13.3.7	Mot
13.3.8	Heiz
13.3.9	Straf
13.3.10	Zusä
13.4	Modelltechn
13.5	Ausgeführte
13.5.1	Win
13.5.2	Mod
13.5.3	Klin
13.5.4	Übe
13.6	Ausblick . .
14	Numerische Meth
	Thomas Schütz, N
14.1	Dreidimens
14.1.1	Anf
14.1.2	Gru
14.1.3	Latt
14.1.4	Nav
14.1.5	Roti
14.1.6	Por
14.1.7	Der
14.1.8	Har
14.1.9	Inte
14.1.10	Aus
14.2	Simulation
14.2.1	Einl
14.2.2	Ber
14.2.3	Que
14.2.4	Tran
14.2.5	Beis
14.2.6	Zus
	Die Autoren (nach Kap
	Institute, Organisation
	Formelzeichen
	Literatur
	Sachverzeichnis

790
790
793
795
796
799
799
801
801
806
815
819
819
820
822
824
824
824
824
827
827
831
ls Widde-
831
833
833
836
842
849
852
854
855
855
856
856
868
876
879
891
891
893
900
906
913

13.3.6	Untersuchung der Fahrzeugverschmutzung	917
13.3.7	Motorkühlungstests	920
13.3.8	Heizungs- und Klimatisierungstests	924
13.3.9	Straßenmessungen	927
13.3.10	Zusätzliche Ausrüstung in Klima- und Thermowindkanälen	937
13.4	Modelltechnik – dimensionslose Kennzahlen	940
13.5	Ausgeführte Fahrzeugwindkanäle	945
13.5.1	Windkanäle für Fahrzeuge im 1 : 1-Maßstab	946
13.5.2	Modellwindkanäle	952
13.5.3	Klima- und Thermowindkanäle	955
13.5.4	Übersicht und Vergleichsmessungen	958
13.6	Ausblick	965
14	Numerische Methoden	967
	Thomas Schütz, Njorbert Grün und Reinhard Blumrich	
14.1	Dreidimensionale Simulation reibungsbehafteter Strömungen	968
14.1.1	Anforderungen und Eigenschaften von CFD-Verfahren	970
14.1.2	Grundzüge der kinetischen Gastheorie	971
14.1.3	Lattice-Methoden	974
14.1.4	Navier-Stokes-Verfahren	985
14.1.5	Rotierende Geometrien (Räder, Lüfter)	1018
14.1.6	Poröse Medien (Wärmetauscher)	1020
14.1.7	Der Lösungsweg	1021
14.1.8	Hardware und Benchmarking	1035
14.1.9	Integration von CFD in den Entwicklungsprozess	1041
14.1.10	Ausblick	1043
14.2	Simulation der Aeroakustik von Fahrzeugen	1044
14.2.1	Einleitung	1045
14.2.2	Berechnung der aerodynamischen und aeroakustischen Quellen	1047
14.2.3	Quellen und Schallfeld im Außenbereich	1049
14.2.4	Transfer in den Innenraum	1053
14.2.5	Beispiele aus der Praxis	1056
14.2.6	Zusammenfassung und Ausblick	1065
	Die Autoren (nach Kapiteln sortiert)	1069
	Institute, Organisationen, Veranstaltungen	1075
	Formelzeichen	1081
	Literatur	1091
	Sachverzeichnis	1137