

· 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,  
Fahrtdynamik, Komfort

6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1171 Abbildungen und 49 Tabellen

 Springer Vieweg

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> . . . . .	<b>1</b>
	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
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Aerodynamik</b>	<b>69</b>
	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
<b>3</b>	<b>Verbrauch und Fahrleistungen</b>	<b>137</b>
	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 <sub>2</sub> - 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 <sub>2</sub>
3.8.3	Gese
3.8.4	CO <sub>2</sub>
3.8.5	Gese
<b>4</b>	<b>Luftkräfte und der</b>
	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			
69			
69			
69			
74			
75			
76			
77			
78			
81			
85			
85			
87			
96			
101			
101			
102			
105			
108			
111			
118			
120			
132			
132			
133			
137			
137			
140			
140			
141			
143			
143			
144			
144			
145			
145			
147			
147			
149			
150			
152			
155			
155			
155			
	3.5.3	NEFZ-Zyklus für hybride Antriebe . . . . .	156
	3.5.4	US-Amerikanische Zyklen . . . . .	157
	3.5.5	Asiatische Zyklen . . . . .	158
	3.5.6	WLTP – Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure . . . . .	159
	3.5.7	Reale Zyklen . . . . .	160
	3.6	Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung . . . . .	160
	3.6.1	Energieflussdiagramm . . . . .	160
	3.6.2	Motorwirkungsgrad und -kennfelder . . . . .	162
	3.6.3	Nebenaggregate . . . . .	163
	3.6.4	Getriebe . . . . .	164
	3.6.5	Fahrzeugmasse . . . . .	166
	3.6.6	Rollwiderstand . . . . .	167
	3.6.7	Luftwiderstand . . . . .	167
	3.7	Luftwiderstandsreduzierung . . . . .	168
	3.7.1	Möglichkeiten zur Widerstandsreduktion . . . . .	169
	3.7.2	Gewichtsäquivalent . . . . .	169
	3.7.3	Amortisationsbetrachtung . . . . .	170
	3.8	Verbrauchsgesetze und Labels . . . . .	171
	3.8.1	Gesetze in der EU . . . . .	172
	3.8.2	CO <sub>2</sub> -Labels in der EU . . . . .	173
	3.8.3	Gesetze in USA . . . . .	173
	3.8.4	CO <sub>2</sub> -Labels in den USA . . . . .	175
	3.8.5	Gesetze in Asien . . . . .	176
	4	<b>Luftkräfte und deren Beeinflussung an Personenkraftwagen</b> . . . . .	177
		Thomas Schütz, Lothar Krüger und Manfred Lentzen	
	4.1	Luftkräfte und deren Beiwerte . . . . .	180
	4.2	Strömungsphänomene an Pkw . . . . .	186
	4.2.1	Totwasser . . . . .	187
	4.2.2	Längswirbel . . . . .	192
	4.2.3	Durchströmung . . . . .	194
	4.2.4	Umgebungseinflüsse . . . . .	196
	4.2.5	Einfluss der Reynolds-Zahl . . . . .	197
	4.3	Analyse der Anteile am Luftwiderstand . . . . .	198
	4.3.1	Druck- und Reibungswiderstand . . . . .	199
	4.3.2	Micro-Drag . . . . .	201
	4.3.3	Analyse nach Einzelanteilen . . . . .	203
	4.4	Übrige Komponenten von Luftkraft und -moment . . . . .	223
	4.4.1	Auftrieb und Nickmoment . . . . .	223
	4.4.2	Seitenkraft und Giermoment . . . . .	224
	4.4.3	Rollmoment . . . . .	226
	4.5	Beeinflussung der Luftkräfte . . . . .	227
	4.5.1	Einfluss der Grundform . . . . .	228
	4.5.2	Kühlfluteinfluss . . . . .	294
	4.5.3	Anbauteile . . . . .	307
	4.5.4	Interferenz . . . . .	337
	4.6	Der aerodynamische Entwicklungsprozess . . . . .	353
	4.6.1	Zieldefinition . . . . .	354
	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
<b>5</b>	<b>Aerodynamik und Fahrstabilität</b>	<b>383</b>
	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
<b>6</b>	<b>Funktion, Sicherheit und Komfort</b>	<b>441</b>
	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
<b>7</b>	<b>Kühlung und Durchströmung</b>	<b>485</b>
	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	
<b>8</b>	<b>Umströmungsgerät</b>	
	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  
362  
362  
363  
364  
366  
370  
372  
373  
377  
377  
379  
380  
  
383  
  
384  
384  
386  
415  
415  
419  
428  
429  
  
441  
  
442  
442  
442  
446  
452  
452  
453  
453  
454  
459  
463  
464  
464  
469  
481  
  
485  
  
485  
486  
486  
489

7.2	Kühlsystem	490
7.2.1	Motorkühlkreislauf	490
7.2.2	Grundlagen der Wärmeübertragung	491
7.2.3	Wärmetauscher Bauarten	493
7.2.4	Wärmetauscher im Fahrzeug	495
7.3	Durchströmung	498
7.3.1	Betriebspunkte	498
7.3.2	Kühlmodul	500
7.3.3	Lüfter	501
7.4	Optimierung Gesamtsystem	503
7.4.1	Berechnung des Kühlluftmassenstroms	503
7.4.2	Einflussparameter der Durchströmung	507
7.4.3	Luftintritte und Kühlluftführung	509
7.4.4	Kühlermatrix	510
7.4.5	Lüfter	513
7.4.6	Motorraum	515
7.4.7	Luftaustritte	517
7.5	Messtechnik für Kühlluftströmung	518
7.5.1	Flügelradanemometer	519
7.5.2	Druckmessungen	519
7.5.3	Optische Messmethoden	520
7.5.4	Hitzdraht-Anemometrie	520
<b>8</b>	<b>Umströmungsgeräusche</b>	<b>523</b>
	Martin Helfer	
8.1	Bedeutung der Umströmungsgeräusche für das Innen- und Außengeräusch von Kraftfahrzeugen	523
8.2	Aeroakustische Geräuschenstehung	526
8.3	Aeroakustische Messtechnik	528
8.3.1	Aeroakustische Windkanäle	528
8.3.2	Messung von Innengeräuschen	528
8.3.3	Messung von Außengeräuschen	529
8.3.4	Messung von Körperschall	534
8.3.5	Schallquellenortung mit Hilfe von Spezialinstrumenten	534
8.4	Hauptgeräuschquellen und Minderungsmöglichkeiten	535
8.4.1	Leckagen	535
8.4.2	Außenspiegel	536
8.4.3	Scheibenwischer	538
8.4.4	Antennen	538
8.4.5	A-Säule	539
8.4.6	Hohlraumresonanzen	540
8.4.7	Schiebedach-Öffnungsgeräusche	542
8.4.8	Radhäuser	542
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
<b>9</b>	<b>Hochleistungsfahrzeuge . . . . .</b>	<b>551</b>
	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
<b>10</b>	<b>Nutzfahrzeuge . . . . .</b>	<b>651</b>
	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
<b>11</b>	<b>Motorradaerodynam</b>
	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	Aeroakt
11.4	Entwicklungsst
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	<b>Motorradaerodynamik</b>	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
<b>12</b>	<b>Schutzhelme</b>	<b>799</b>
	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 Kunstkopfmessetechnik	827
12.4.5	Numerische Berechnungen der Strömung (CFD)	827
<b>13</b>	<b>Windkanäle und Messtechnik</b>	<b>831</b>
	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 . .
<b>14</b>		<b>Numerische Meth</b>
		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
<b>14</b>	<b>Numerische Methoden . . . . .</b>	<b>967</b>
	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
	<b>Die Autoren (nach Kapiteln sortiert) . . . . .</b>	<b>1069</b>
	<b>Institute, Organisationen, Veranstaltungen . . . . .</b>	<b>1075</b>
	<b>Formelzeichen . . . . .</b>	<b>1081</b>
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>1091</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>1137</b>