

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 reibungslose, 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 Luftwiderstandsverringern	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 Hucho

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	Fahrsimulator	285
5.7	Bezeichnungen	289

6 Funktion, Sicherheit und Komfort

Raimund Piatak

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 Rauser

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 Sozius	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	Kuhlssysteme	456
10 2 1	Wasserkühlung	456
10 2 2	Luftkühlung	458
10 2 3	Kühlung mit Bauteiltemperaturregelung	458
10 2 4	Zweikreiskuhlssystem und Warmlaufkonzept	459
10 2 5	Heißkühlung	460
10 2 6	Ölkühlung	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 Gehäusewand	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 Kuhlssystemen	472
10 3 2 1	Konzeption des Verfahrens	472
10 3 2 2	Kühlmittelkreislauf	472
10 3 2 3	Lufter und Lufterkupplung	473
10 3 2 4	Kühlluftsystem	474
10 3 2 5	Wärmebilanz an Motor und Motoroberfläche	474
10 3 2 6	Wärmebilanz am Kühler	475
10 3 2 7	Medienwärmeflußmessung am Vollmotor	475
10 4	Fahrzeuginnenstromung	478
10 4 1	Kühlluftsystem	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	Kühlmittelkühler	487
10 4 3	Lufter für Kühler	489
10 4 3 1	Aufgaben des Kühlerlufters	489
10 4 3 2	Bauarten für Lufter 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	Geräuscentwicklung	496
10.4.3.3.4	Masse und Bauraum	497
10.5	Bezeichnungen	499

11 Heizung, Lüftung, Klimatisierung von Pkw

Holger Großmann

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	Gebälsekennlinien	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-Ausstelldach	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 Fahrgastraum	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	Ausgeführte Anlagen	537
11 8 1	Luftgesteuertes Heizgerät	537
11 8 2	Wassergesteuertes Heizgerät	538
11 8 3	Integrierte Klimaanlage	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	Windkanalkorrekturen	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	Ausgeführte Fahrzeug-Windkanäle	589
12 5 1	Einteilung der Versuchsanlagen	589
12 5 2	Windkanäle für Fahrzeuge in natürlicher Größe	592
12 5 3	Modellwindkanäle	596
12 5 4	Klimakanäle	597
12 5 5	Blaskanäle	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 Entfroistungstests	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- ϵ -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
Abkürzungen		697
Literaturverzeichnis		699
Sachwörterverzeichnis		733
Namenverzeichnis		743
Die Autoren		749