

Wolf-Heinrich Hucho

Aerodynamik der stumpfen Körper

Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis

2. Auflage



VIEWEG+
TEUBNER

Wolf-Heinrich Hucho

Aerodynamik der stumpfen Körper

Technische Strömungslehre

von L. Böswirth und S. Bschorer

Aerodynamik des Automobils

herausgegeben von W.-H. Hucho

Technische Strömungsmechanik

von W. Kümmel

Numerische Strömungsmechanik

von E. Laurien und H. Oertel

Strömungsmechanik

von H. Oertel jr., M. Böhle und T. Reviol

Prandtl - Führer durch die Strömungslehre

herausgegeben von H. Oertel jr.

Wolf-Heinrich Hucho

Aerodynamik der stumpfen Körper

Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis
2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage
Mit 568 Abbildungen und 56 Tabellen



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

1. Auflage 2002
2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.
Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Umschlagbild: D. Söderblom, P. Elofsson, L. Hjelm, L. Löfdahl
Technische Redaktion: Stefan Kreickenbaum | Gabriele McLemore
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1462-3

Vorwort

Lange bevor Leonardo da Vinci beobachtete, dass in einer Strömung die schlanken Körper einen geringeren Widerstand aufweisen, als die stumpfen, hat die Menschheit von dieser Erkenntnis intuitiv Gebrauch gemacht: So werden, um ein Beispiel zu nennen, Schiffsrümpfe seit eh und je schlank ausgeführt, wenn sie schnell sein sollen. Leonardo identifizierte auch die Ursache dafür: Sie werden umströmt, kaum dass sich Wirbel bilden; in heutiger Diktion: ohne dass die Strömung von der Körperkontur ablöst.

Als man, sehr viel später, damit begann, Strömungsvorgänge systematisch in Maschinen zu nutzen, setzte man alles daran, die Strömung anliegend zu halten: Die Schaufeln einer Turbine und die Tragflügel eines Flugzeuges werden so ausgelegt, dass in ihrem Arbeitsbereich keine Ablösung auftritt. Die Entwicklung und die ständige Verbesserung ihrer Profile stand schon immer im Brennpunkt der „klassischen“ Aerodynamik. Dem gegenüber trat die Gestaltung der Ablösung an stumpfen Körpern in den Hintergrund.

Nimmt man jedoch Umsatz, Gewinn und Beschäftigung, die zu Produkten führen, die auf einer bestimmten Sparte der Physik basieren, als Maß für die ökonomische Bedeutung eben dieses Teilgebietes der Physik, dann kommt der Aerodynamik der stumpfen Körper zumindest der gleiche Rang zu, wie der der schlanken. Konkret: Die Aerodynamik der Fahrzeuge – Autos wie Bahnen - und der Bauwerke hat wirtschaftlich keine geringere Bedeutung, als die der oben genannten „Strömungsmaschinen“. Dennoch finden die stumpfen Körper in den Lehrbüchern der Aerodynamik ebenso wenig Beachtung, wie in den relevanten Vorlesungen.

Wenn nun ein Ingenieur, der über ein solides Grundwissen in der klassischen Aerodynamik verfügt, mit einem Problem aus dem Bereich stumpfer Körper konfrontiert wird, dann wird er feststellen, dass er über diese nur wenig weiß. Die verschiedenen Formen von Ablösung und die damit verbundenen dynamischen Vorgänge sind ihm während seines Studiums kaum begegnet - es sei denn, er hat eine Vorlesung über die Aerodynamik von Fahrzeugen oder Bauwerken gehört. Die fehlenden Kenntnisse wird er sich aus einer Vielzahl von Einzelveröffentlichungen zusammensuchen müssen; eine geschlossene Darstellung der Aerodynamik der stumpfen Körper gab es bisher nicht.

Andererseits haben die Wissenschaftler, die sich mit den physikalischen Phänomenen an stumpfen Körpern auseinandersetzen, häufig nur wenig Bezug zur Praxis, in der die Ergebnisse der Forschung ingenieurmäßig umgesetzt werden, und die technische Literatur, so es sie denn überhaupt gibt, ist ihnen eher fremd.

Die Lücken beider, der Anwender wie der Forscher, sollen mit dem vorliegenden Buch geschlossen werden. Um das zu erreichen, wird der Stoff in drei Abschnitte gegliedert:

- Die relevanten strömungsmechanischen Phänomene werden beschrieben: anliegende Strömung, Grenzschicht, Umschlag laminar-turbulent, Ablösung und Wiederanlegen, Scherschichten, Totwasser und Nachlauf. Soweit erforscht, werden für diese Strömungsformen universelle Modelle angegeben, und diese werden an geometrisch einfachen Körpern verifiziert. Dagegen wird auf die ausführliche Herleitung der Gesetze der theoretischen Strömungsmechanik verzichtet; sie kann anhand der einschlägigen Lehrbücher nachgeholt werden.

- Bei den Anwendungen geht es um drei Bereiche: Automobile, Bahnen und Bauwerke. Wo immer das möglich und sinnvoll ist, werden die dort auftretenden Phänomene auf die Vorgänge an elementaren Körpern zurückgeführt, werden Querverbindungen hergestellt.
- Die relevanten Aufgabenstellungen werden in der Praxis sowohl experimentell als auch numerisch bearbeitet. Die Methoden beider Kategorien weisen viele Gemeinsamkeiten mit denen auf, die in der klassischen Aerodynamik zur Anwendung kommen. Bei ihrer Beschreibung wird der Akzent auf die besonderen Gegebenheiten bei den stumpfen Körpern gesetzt.

Das gegenwärtige Buch ist aus dem Manuskript einer Vorlesung hervorgegangen. Einer Vorlesung, die nie gehalten wurde. Das, weil der Autor durch des „Geschickes Mächte“, mit denen bekanntlich kein „ewiger Bund zu flechten“ ist¹, daran gehindert wurde. Es stellt somit ein Stück „gesammeltes Schweigen“ dar. Aber anders als bei Dr. Murke, von dessen originellem Umgang mit der Schweigsamkeit Heinrich Böll erzählt, hat das Schweigen des Autors einen Inhalt, und dessen Kenntnis ist vielleicht dem einen oder anderen Leser nützlich.

Das Buch wendet sich an Ingenieure und Physiker, die an der Gestaltung stumpfer Körper mitwirken, sei es in der Konstruktion, in der Berechnung oder im Versuch. Es richtet sich an Fachleute in den relevanten Behörden und – last but not least – an Professoren und Studenten des Maschinenbaus, der Fahrzeugtechnik und des Bauingenieurwesens.

Bei der Ausarbeitung des Manuskriptes der ersten Auflage ist mir von einer großen Zahl von Fachkollegen Hilfe zuteil geworden; im einzelnen waren das die Herren: S.R. Ahmed; J. Amtsberg; H. Appel; P. Bearman; G. Buresti; A. Cogotti; D. Geropp; D. Geyer; D. Hummel; B. Hupertz; M.P.G. Jaroch; H. Kerschbaum; H. Körner; N. Lindener; L. Lührmann; P.-A. Mackrodt; H. Nowacki; H.-D. Papenfuß; A. Pernpeintner; J.-L. Peters; J. Plischka; R. Radespiel; W. Rodi; G. Schewe; P. Schmid; B. Schulte-Werning; G. Sovran; M. Tanner; G. Taylor; P.R. Viswanath; J. Wiedemann; C.H.K. Williamson. Ihnen allen bin ich zu herzlichem Dank verpflichtet.

Weiter erhielt ich Unterstützung dadurch, dass ich in einer Reihe von Bibliotheken arbeiten durfte: im Zentrum Göttingen (vormals AVA) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der TU München und im Institut für Strömungsmechanik der TU Braunschweig. Als große Hilfe bei der Beschaffung der umfangreichen Literatur erwies sich der Dienst „subito“, den die wissenschaftlichen Bibliotheken hierzulande unterhalten. Allen Leitern und Mitarbeitern der genannten Einrichtungen sei vielmals gedankt.

Von verschiedenen Seiten wurde der Autor ermuntert, der ersten Auflage die hier vorgelegte zweite folgen zu lassen. Der Digitaldruck macht es möglich, kleine Auflagen nach Bedarf preiswert herzustellen: „Book on Demand“ (BOD). Um die Herstellkosten weiter zu reduzieren, hat es der Autor auf sich genommen, Layout und Umbruch selbst auszuführen.

Die dreiteilige Struktur des Buches wurde beibehalten: Grundlagen, Anwendungen, Methoden. Der Inhalt wurde aktualisiert, vor allem im Kapitel über die numerische Simulation, zu dem Thomas Schütz die Neufassung des Abschnittes über die für die Praxis aktuellen CFD-Verfahren beisteuerte. Wie bisher wird die Verbindung zur relevanten Mechanik gehalten. Das zunehmend in modernerer Betrachtungsweise: Die dynamischen Vorgänge, die lange Zeit vornehmlich im Zeitbereich behandelt wurden, werden nunmehr, wo immer das möglich ist,

¹ Worte in Parenthese aus Friedrich v. Schiller: Das Lied von der Glocke.

im Frequenzbereich dargestellt; als Beispiel möge die Reaktion von Fahrer und Fahrzeug auf stochastischen Seitenwind dienen.

Wiederum wurde mir Hilfe durch eine Reihe von Fachkollegen zuteil: D. Bergmann, U. Brennenstuhl, E. Duell, M. Gohlke, M. Islam, S. Kopp, S. Lämmlein, S. Loose, C. Nayeri, A. Pernpeintner, J.L. Peters, T. Schütz, A. Wagner, R. Wüchner. Ihnen allen danke ich ganz herzlich.

Herrn Ewald Schmitt, Verlagsbereichsleiter und Cheflektor in einer Person und seiner Assistentin, Frau Elisabeth Lange, sei für ihre Motivation und ihre Unterstützung bei der Überarbeitung gedankt, dem Cheflektor auch für seine Geduld mit dem Autor. Dank schulde ich auch Frau Gabriele McLemore, die die Korrektur las und Herrn Stefan Kreickenbaum, der die Tücken des Formeleditors überwand.

Schondorf am Ammersee im Sommer 2011

Wolf-Heinrich Hucho

Inhaltsverzeichnis

1	Schlanke und stumpfe Körper	1
1.1	Anliegende und abgelöste Strömungen	2
1.2	Definition der stumpfen Körper	5
1.3	Beeinflussung der Umströmung	10
2	Strömungsphänomene	12
2.1	Umströmung von Körpern	13
2.2	Kräfte und Momente	17
2.3	Grenzschicht	23
2.3.1	Ebene Platte und schlanke Körper	23
2.3.2	Turbulenz, das Phänomen	31
2.3.3	Rauhigkeit	36
2.4	Abgelöste Strömungen	38
2.4.1	Das Phänomen Ablösung	38
2.4.2	Scherschichten	41
2.4.3	Totwasser	46
2.4.4	Nachlauf	50
2.5	Beeinflussung des Totwassers	53
2.5.1	Zielsetzung und Möglichkeiten	53
2.5.2	Geometrie	55
2.5.2.1	Einzüge bei Rotationskörpern	55
2.5.2.2	Dreidimensionaler Abschluss	60
2.5.3	Eingriff in die Struktur des Totwassers, <i>passiv</i>	61
2.5.3.1	Überführung des periodischen in ein aperiodisches Totwasser	61
2.5.3.2	Verschieben des Totwassers	68
2.5.3.3	Platzen der Randwirbel	71
2.5.4	Eingriffe von außen	72
2.5.4.1	Leitbleche und Flügel	72
2.5.4.2	Mäßig dreidimensionale Effekte	73
2.5.4.3	Künstliche Verdickung der Grenzschicht	77
2.5.5	Eingriff in die Struktur des Totwassers, <i>aktiv</i>	78
2.6	Wirkung auf das Umfeld	81
2.7	Bodennähe	83
2.8	Aerodynamisch angeregte Schwingungen	87
2.9	Strömungsgeräusche	90
2.9.1	Bewertung	90
2.9.2	Zeitabhängiges Ausströmen	92
2.9.3	Umströmung eines Körpers	92
2.9.4	Turbulente Strömung	93

3	Geometrisch einfache Körper	94
3.1	Kreiszylinder	95
3.1.1	Zweidimensionale Betrachtung	95
3.1.2	Dreidimensionale Effekte	108
3.1.3	Schiebende Zuströmung	114
3.2	Kugel	115
3.3	Elliptische Zylinder, Ellipsoide und andere Rotationskörper	121
3.4	Keil und Kegel	123
3.5	Prismen	133
3.5.1	Proportionen und Strömungsform	133
3.5.2	Stumpfe Vorderkante	133
3.5.3	Tiefe, Höhe und Breite	139
3.5.4	Basis	142
3.5.5	Schräganströmung	143
3.5.6	Quader auf dem Boden	143
3.6	Mehrere Körper	151
3.6.1	Konfigurationen	151
3.6.2	Gleiche Körper	152
3.6.2.1	Körper hintereinander	152
3.6.2.2	Körper nebeneinander	156
3.6.2.3	Mehrere gleiche Körper	159
3.6.3	Körper unterschiedlicher Form und Größe	160
3.6.4	Leitvorrichtungen	169
3.7	Wirkung der Turbulenz	171
4	Modelle von Totwasser, Scherschichten und Nachlauf	178
4.1	Ziele der Modellierung	179
4.2	Ältere Modelle	181
4.2.1	Beobachtungen und Hilfovstellungen	181
4.2.2	Erstes Modell von Tanner	184
4.2.3	Zweites Modell von Tanner	188
4.3	Modelle mit Abbildung des Strömungsfeldes im Totwasser	190
4.3.1	Vorstellung von Hoerner	190
4.3.2	Modell von Chapman	191
4.3.3	Modell von Nash	193
4.3.4	Modell der diskreten Wirbel	196
4.3.5	Kármánsche Wirbelstraße	199
4.4	Dreidimensionale Modelle	203
4.5	Modelle mit skalierten Totwassergrößen	204
4.5.1	Modell von Roshko und Lau	204
4.5.2	Normierung des Totwasserdruckes nach Calvert	208
4.5.3	Modell von Gersten, Papenfuß und Dilgen	208
4.5.4	Modell von Geropp, Kim und Mildebrath	211
4.6	Nachlauf	213

5	Wind und Windschutz	217
5.1	Die Atmosphäre	218
5.2	Ursachen für den Wind	218
5.3	Eigenschaften des Windes	220
5.3.1	Bodengrenzschicht	220
5.3.2	Ekman-Spirale	225
5.3.3	Böigkeit, Turbulenz	226
5.4	Windstatistik	233
5.4.1	Anforderungen	233
5.4.2	Verfügbare Daten	234
5.5	Wetter und lokale Winde	238
5.6	Topographie	240
5.7	Windschutz	243
6	Automobile	248
6.1	Zielgrößen	249
6.2	Lehren aus der Geschichte	252
6.2.1	Evolution der Aerodynamik	252
6.2.2	Aerodynamik und Design	255
6.3	Fahrleistungen	257
6.3.1	Fahrwiderstandsgleichung	257
6.3.2	Senkung des Kraftstoffverbrauchs	261
6.3.3	Steigerung der Höchstgeschwindigkeit	263
6.4	Luftkräfte und -momente bei symmetrischer Anströmung	264
6.4.1	Widerstand	264
6.4.1.1	Umströmung	264
6.4.1.2	Durchströmung	276
6.4.1.3	Interferenz	278
6.4.2	Auftrieb und Nickmoment	281
6.4.3	Widerstand bei Schräganströmung	282
6.5	Fahrtrichtungshaltung	285
6.5.1	Regelkreis der Querdynamik	285
6.5.2	Kräfte und Momente bei Schräganströmung	287
6.5.3	Instationäre Zuströmung	293
6.6	Strömung auf der Oberfläche	295
6.6.1	Strömungsdetails	295
6.6.2	Öffnungen	295
6.6.3	Kräfte auf Einzelteile	297
6.6.4	Windgeräusche	297
6.7	Mehrphasenströmungen	299
6.7.1	Eigenverschmutzung	299
6.7.2	Fremdverschmutzung	301
6.8	Möglichkeiten der weiteren Entwicklung	302
6.8.1	Status quo	302
6.8.2	Grenzwert-Strategie	303
6.8.3	Umsetzung	303
6.8.4	Regeneratives Bremsen	304

7 Eisenbahnen	306
7.1 Rückblick	307
7.2 Fahrleistungen	312
7.3 Luftwiderstand	317
7.4 Fahrt bei Seitenwind	326
7.4.1 Auswirkung des Windes auf die Fahrleistung	326
7.4.2 Sicherheit und Laufgüte	327
7.5 Wirkung auf das Umfeld	336
7.5.1 Phänomene	336
7.5.2 Kopfwelle	336
7.5.3 Fahrtwind	347
7.5.3.1 Sicherheitsabstand	347
7.5.3.2 Fahrtwind infolge Grenzschicht	347
7.5.3.3 Fahrtwind infolge Totwasser und Nachlauf	349
7.6 Fliegende Begegnung	350
7.7 Fahrt durch den Tunnel	355
7.7.1 Beobachtungen	355
7.7.2 Kopfwelle am Tunnelportal	356
7.7.3 Einfahrstoß und Druckwellen	358
7.7.4 Sonic boom und Infrasonnd	359
7.7.5 Widerstand im Tunnel	361
7.8 Aeroakustik	362
7.8.1 Schallquellen	362
7.8.2 Rollgeräusch	363
7.8.3 Umströmungsgeräusch	365
7.8.4 Stromabnehmer	368
7.8.5 Neue Kopfformen	371
8 Bauwerke	372
8.1 Windschäden	373
8.2 Aufgabenstellung	377
8.2.1 Umfang	377
8.2.2 Lösungsweg	377
8.3 Kräfte und Momente bei statischer Windlast	381
8.3.1 Zwei- und dreidimensionale Betrachtung	381
8.3.2 Baukörper	382
8.3.3 Dach	384
8.3.4 Fuß	385
8.3.5 Divergenz	386
8.3.6 Statische Interferenz	387
8.4 Auszüge aus der Windlastnorm	388
8.4.1 Anpassung an den Stand des Wissens	388
8.4.2 Windgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsdruck	389
8.4.3 Windkraft	390
8.5 Dynamische Beanspruchung	392
8.5.1 Abschätzung der Eigenfrequenz	392
8.5.2 Aerodynamische Erregermechanismen	396
8.5.2.1 Fremd- und selbsterregte Schwingungen	396

	8.5.2.2	Zielsetzung bei der Dimensionierung	397
8.5.3		Periodische Phänomene	398
	8.5.3.1	Wirbelinduzierte Schwingung, Locking-in	398
	8.5.3.2	Wirbelinduzierte Schalenschwingung, Ovalling	404
	8.5.3.3	Bewegungsinduzierte Schwingungen, Galloping	405
	8.5.3.4	Flattern	409
8.5.4		Stochastische Anregung, Buffeting	414
8.5.5		Biegeweiche Konstruktionen	416
8.6		Innere Strömungen	421
9		Versuchswesen	423
9.1		Modelltechnik	424
	9.1.1	Mechanische Ähnlichkeit	424
	9.1.2	Modellversuche	426
9.2		Messungen mit stationärem Modell	431
	9.2.1	Auszug aus der Windkanaltechnik	431
		9.2.1.1 Anforderungen an die Windkanäle	431
		9.2.1.2 Bauformen	432
		9.2.1.3 Messstrecke	433
		9.2.1.4 Simulation des Bodens	436
		9.2.1.5 Windkanal-Korrekturen	442
	9.2.2	Ausgeführte Windkanäle	445
		9.2.2.1 Vorbemerkungen	445
		9.2.2.2 Für Straßenfahrzeuge	446
		9.2.2.3 Für Schienenfahrzeuge	449
		9.2.2.4 Für Bauwerke	453
		9.2.2.5 Temperatur und Druck variabel	454
	9.2.3	Wasserkanäle	457
9.3		Messungen mit bewegtem Prüfling	459
	9.3.1	Aufgabenstellung	459
	9.3.2	Seitenwind	460
		9.3.2.1 Mit dem Original	460
		9.3.2.2 Mit verkleinerten Modellen im Windkanal	463
		9.3.2.3 Mit Katapult im Tunnel und bei Seitenwind	464
		9.3.2.4 Pendel	465
		9.3.2.5 Schlepptanks	466
	9.3.3	Modellhalterungen	467
		9.3.3.1 Modelle starr	467
		9.3.3.2 Modelle elastisch	468
9.4		Messtechnik	469
	9.4.1	Anforderungen	469
	9.4.2	Kräfte und Momente	469
	9.4.3	Deformationen und Schwingungen	471
	9.4.4	Druck	471
	9.4.5	Geschwindigkeit	474
		9.4.5.1 Methoden	474
		9.4.5.2 „Klassische“ Sonden	475
		9.4.5.3 Schalenkreuz und Flügelrad	475

9.4.5.4	Hitzdraht-Anemometer	477
9.4.5.5	Laser-Doppler-Anemometrie	479
9.4.5.6	Particle-Image-Velocimetrie	482
9.4.6	Strömungsgeräusche	483
9.4.6.1	Aufgaben	483
9.4.6.2	Einzelmikrofon	484
9.4.6.3	Kunstkopf	487
9.4.6.4	Akustischer Hohlspiegel	487
9.4.6.5	Reihen-Mikrofone	489
9.5	Sichtbarmachung der Strömung	491
9.6	Geometrische Messungen	495
9.6.1	Stirnfläche	495
9.6.2	Formen	496
10	Numerische Verfahren	498
10.1	Vollständige Bewegungsgleichungen	499
10.2	Ansätze zur Lösung	501
10.2.1	Ein Wettrennen	501
10.2.2	„Exakte“ Modelle	502
10.2.2.1	Analytische Modelle	502
10.2.2.2	Parallelen zur Tragflügeltheorie	502
10.2.2.3	Auftrieb und Widerstand	503
10.2.3	Bewertungsverfahren	504
10.2.4	Der „klassische“ Weg	506
10.2.4.1	Konzept	506
10.2.4.2	Elektrolytischer Trog	507
10.2.4.3	Panel und Wirbelleiter	508
10.2.4.4	Panel, Grenzschicht und Totwasser	516
10.2.4.5	Eulergleichungen mit enger Grenzschichtkopplung	519
10.2.4.6	Grenzen des „klassischen“ Weges	521
10.3	Dreidimensionale Simulation reibungsbehafteter Strömungen	523
10.3.1	RANS-Verfahren	523
10.3.1.1	Reynolds-Gemittelte-Navier-Stokes-Gleichungen	523
10.3.1.2	Turbulenzmodelle	524
10.3.1.3	Wandgesetz	526
10.3.1.4	Ergebnisse	528
10.3.2	Large-Eddy-Simulation	530
10.3.2.1	Grundgleichungen zur Large-Eddy-Simulation	530
10.3.2.2	Einfluss der Zellgröße	532
10.3.2.3	Detached-Eddy-Simulation	532
10.3.2.4	Ergebnisse von LES- und DES-Simulationen an stumpfen Körpern	533
10.3.3	Direkte numerische Simulation	537
10.3.4	Lattice-Boltzmann-Methode	541
10.3.4.1	Boltzmann-Gleichung	541
10.3.4.2	Übergang zur Lattice-Boltzmann-Gleichung	543
10.3.4.3	Weitere Aspekte zum LBM	545
10.3.4.4	Ergebnisse	546

10.3.5	Lösungsweg	550
10.3.5.1	Diskretisierung	550
10.3.5.2	Numerische Netze	551
10.3.5.3	Lösungsalgorithmen	554
10.3.5.4	Postprocessing	557
10.3.6	Vergleich	558
10.3.7	Hardware	561
10.3.8	Ausblick	563
Farbige Bilder und Tabellen		565
Literaturverzeichnis		573
Sachwortverzeichnis		607
Abkürzungen		620