

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](http://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“ ist<sup>1</sup>, 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,

---

<sup>1</sup> 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

<b>1</b>	<b>Schlanke und stumpfe Körper</b> .....	1
1.1	Anliegende und abgelöste Strömungen .....	2
1.2	Definition der stumpfen Körper .....	5
1.3	Beeinflussung der Umströmung .....	10
<b>2</b>	<b>Strömungsphänomene</b> .....	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

<b>3</b>	<b>Geometrisch einfache Körper</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Modelle von Totwasser, Scherschichten und Nachlauf</b> .....	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

<b>5</b>	<b>Wind und Windschutz</b> .....	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
<b>6</b>	<b>Automobile</b> .....	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

<b>7 Eisenbahnen</b> .....	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
<b>8 Bauwerke</b> .....	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
<b>9</b>	<b>Versuchswesen</b> .....		<b>423</b>
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
<b>10</b>	<b>Numerische Verfahren .....</b>	<b>498</b>
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
 <b>Farbige Bilder und Tabellen</b> .....		 565
 <b>Literaturverzeichnis</b> .....		 573
 <b>Sachwortverzeichnis</b> .....		 607
 <b>Abkürzungen</b> .....		 620