

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Schlanke und stumpfe Körper .....</b>	<b>1</b>
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>	<b>12</b>
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>	<b>94</b>
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>	<b>178</b>
4.1	Ziele der Modellierung	179
4.2	Ältere Modelle	181
4.2.1	Beobachtungen und Hilfsvorstellungen	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>	<b>217</b>
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>	<b>248</b>
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>	<b>306</b>
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 Infrasound	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>	<b>372</b>
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	Biegeeweiche 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