

# 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 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 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 Totwasserdrukkes 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 Einfahrstöß 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>	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