

Inhaltsverzeichnis

1	Schlanke und stumpfe Körper	1
1.1	Anliegende und abgelöste Strömungen	2
1.2	Definition stumpfer Körper	5
2	Strömungsphänomene	11
2.1	Umströmung von Körpern	12
2.2	Kräfte und Momente	16
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	Abelöste Strömungen.....	38
2.4.1	Ablösung	38
2.4.2	Scherschicht	42
2.4.3	Totwasser	45
2.4.4	Nachlauf	49
2.5	Beeinflussung des Totwassers	53
2.5.1	Zielsetzung und Möglichkeiten	53
2.5.2	Einzüge	55
2.5.3	Eingriff in die Struktur des Totwassers.....	60
2.5.4	Dreidimensionale Heckformen	74
2.5.5	Ausnutzen „mäßig“ dreidimensionaler Effekte.....	77
2.6	Wirkung auf das Umfeld	80
2.7	Bodennähe	82
2.8	Aerodynamisch angeregte Schwingungen	85
2.9	Strömungsgeräusche	89
2.9.1	Bewertung	89
2.9.2	Zeitabhängiges Ausströmen	90
2.9.3	Umströmung eines Körpers.....	91
2.9.4	Turbulente Strömung	92
3	Geometrisch einfache Körper	93
3.1	Kreiszyylinder	94
3.1.1	Zweidimensionale Betrachtung.....	94
3.1.2	Dreidimensionale Effekte	107
3.1.3	Schiebende Zuströmung.....	113
3.2	Kugel	115
3.3	Elliptische Zylinder, Ellipsoide und andere Rotationskörper	122
3.4	Keil und Kegel.....	124
3.5	Prismen	134
3.5.1	Proportionen und Strömungsform.....	134
3.5.2	Stumpfe Vorderkante	134

3.5.3	Tiefe, Höhe und Breite	140
3.5.4	Basis	144
3.5.5	Schräganströmung	144
3.5.6	Quader auf dem Boden	144
3.6	Mehrere Körper	153
3.6.1	Konfigurationen	153
3.6.2	Gleiche Körper	154
3.6.2.1	Körper hintereinander	154
3.6.2.2	Körper nebeneinander	158
3.6.2.3	Mehrere gleiche Körper	161
3.6.3	Körper unterschiedlicher Form und Größe	162
3.6.4	Leitvorrichtungen	172
3.7	Wirkung der Turbulenz	173
4	Modelle von Totwasser, Scherschicht und Nachlauf	181
4.1	Ansätze zur Modellierung	182
4.2	Ältere Modelle	184
4.3	Scherschicht	191
4.4	Modelle mit Abbildung des Strömungsfeldes	192
4.4.1	Vorstellung von Hoerner	192
4.4.2	Modell von Chapman	193
4.4.3	Modell von Nash	195
4.4.4	Kármánsche Wirbelstraße	198
4.4.5	Zweites Modell von Tanner	202
4.4.6	Modell der diskreten Wirbel	205
4.5	Modelle mit skalierten Totwassergrößen	209
4.5.1	Modell von Roshko und Lau	209
4.5.2	Normierung des Totwasserdruckes nach Calvert	213
4.5.3	Modell von Gersten, Papenfuß und Dilgen	214
4.5.4	Modell von Geropp, Kim und Mildebrath	217
4.5.5	Modell von Hummel und Ramm	219
4.6	Nachlauf	221
5	Wind und Windschutz	225
5.1	Die Atmosphäre	226
5.2	Ursachen für den Wind	226
5.3	Eigenschaften des Windes	228
5.3.1	Bodengrenzschicht	228
5.3.2	Ekman-Spirale	233
5.3.3	Böigkeit, Turbulenz	234
5.4	Windstatistik	242
5.4.1	Anforderungen	242
5.4.2	Verfügbare Daten	242
5.5	Einfluss des Wetters	247
5.6	Einfluss der Topographie	247
5.7	Windschutz	250

6	Automobile	255
6.1	Zielgrößen	256
6.2	Lehren aus der Geschichte	259
6.2.1	Evolution der Aerodynamik	259
6.2.2	Aerodynamik und Design	263
6.3	Fahrleistungen	265
6.3.1	Fahrwiderstandsgleichung	265
6.3.2	Senkung des Kraftstoffverbrauchs	268
6.3.3	Steigerung der Höchstgeschwindigkeit	271
6.4	Luftkräfte und -momente bei symmetrischer Anströmung	272
6.4.1	Der Widerstand	272
6.4.1.1	Umströmung	272
6.4.1.2	Durchströmung	284
6.4.1.3	Interferenz	286
6.4.1.4	Schräganströmung	289
6.4.2	Auftrieb und Nickmoment	292
6.5	Fahrtrichtungshaltung	293
6.5.1	Querdynamik	293
6.5.2	Linearisiertes Fahrzeugmodell	295
6.5.2.1	Fahrt bei Windstille	295
6.5.2.2	Fahrt bei Seitenwind	297
6.5.2.3	Fahrermodell	300
6.5.2.4	Seitenwindempfindlichkeit	301
6.5.3	Aerodynamik bei Schräganströmung	304
6.5.4	Reale Zuströmung	309
6.6	Strömung auf der Oberfläche	310
6.6.1	Strömungsdetails	310
6.6.2	Öffnungen	311
6.6.3	Kräfte auf Einzelteile	312
6.6.4	Windgeräusche	313
6.7	Mehrphasenströmungen	314
6.7.1	Eigenverschmutzung	314
6.7.2	Fremdverschmutzung	316
6.8	Entwicklungstrends	317
6.8.1	Heck	317
6.8.2	Unterseite und Räder	319
7	Eisenbahnen	321
7.1	Rückblick	322
7.2	Fahrleistungen	325
7.3	Luftwiderstand	330
7.4	Fahrt bei Seitenwind	339
7.4.1	Auswirkung des Windes auf die Fahrleistung	339
7.4.2	Sicherheit und Laufgüte	340
7.5	Wirkung auf das Umfeld	347
7.5.1	Phänomene	347
7.5.2	Kopfwelle	348
7.5.3	Fahrtwind	359

7.5.3.1	Sicherheitsabstand	359
7.5.3.2	Fahrtwind infolge Grenzschicht.....	360
7.5.3.3	Fahrtwind infolge Totwasser und Nachlauf.....	362
7.6	Fliegende Begegnung	363
7.7	Fahrt durch den Tunnel.....	368
7.7.1	Beobachtungen.....	368
7.7.2	Einfahrstoß.....	370
7.7.3	Druckwellen.....	373
7.7.4	Sonic boom und infrasound.....	374
7.7.5	Widerstand im Tunnel.....	375
7.8	Aeroakustik.....	377
7.8.1	Schallquellen.....	377
7.8.2	Rollgeräusch.....	378
7.8.3	Umströmungsgeräusch.....	379
7.8.4	Stromabnehmer.....	383
7.8.5	Neue Kopfformen.....	386
8	Bauwerke	387
8.1	Windschäden.....	388
8.2	Aufgabenstellung.....	391
8.3	Kräfte und Momente bei statischer Windlast.....	392
8.3.1	Zwei- und dreidimensionale Betrachtung	392
8.3.2	Baukörper.....	394
8.3.3	Dach.....	395
8.3.4	Fuß.....	397
8.3.5	Divergenz.....	398
8.3.6	Statische Interferenz.....	399
8.4	Windlastnorm	400
8.5	Dynamische Beanspruchung.....	404
8.5.1	Abschätzung der Eigenfrequenz.....	404
8.5.2	Aerodynamische Erregermechanismen.....	408
8.5.2.1	Fremd- und selbsterregte Schwingungen.....	408
8.5.2.2	Zielsetzung bei der Dimensionierung	409
8.5.3	Periodische Phänomene.....	411
8.5.3.1	Wirbelinduzierte Schwingung, Locking-in.....	411
8.5.3.2	Wirbelinduzierte Schalenschwingung, Ovalling.....	416
8.5.3.3	Bewegungsinduzierte Schwingungen, Galloping	417
8.5.3.4	Flattern.....	422
8.5.4	Stochastische Anregung.....	428
8.5.4.1	Deterministischer Ansatz.....	428
8.5.4.2	Probabilistische Betrachtung	429
8.5.5	Biegeeweiche Konstruktionen	431
8.6	Dynamische Interferenz, Buffeting.....	433
8.7	Innere Strömungen.....	435
9	Versuchswesen	437
9.1	Modelltechnik.....	438
9.1.1	Mechanische Ähnlichkeit.....	438

9.1.2	Modellversuche	440
9.2	Messungen mit stationärem Modell	445
9.2.1	Auszug aus der Windkanaltechnik	445
9.2.1.1	Anforderungen an die Windkanäle	445
9.2.1.2	Bauformen	446
9.2.1.3	Messtrecke	447
9.2.1.4	Windkanal-Korrekturen	449
9.2.1.5	Simulation des Bodens	452
9.2.2	Ausgeführte Windkanäle	458
9.2.2.1	Für Automobile	458
9.2.2.2	Für Schienenfahrzeuge	462
9.2.2.3	Für Bauwerke	464
9.2.2.4	Temperatur und Druck variabel	465
9.2.3	Wasserkanäle	469
9.3	Messungen mit bewegtem Modell	470
9.3.1	Aufgabenstellung	470
9.3.2	Pendel	473
9.3.3	Schlepptanks	473
9.3.4	Modellhalterung statisch	475
9.3.5	Modellhalterung dynamisch	476
9.4	Messtechnik	477
9.4.1	Anforderungen	477
9.4.2	Kräfte und Momente	477
9.4.3	Deformationen und Schwingungen	479
9.4.4	Druck	479
9.4.5	Geschwindigkeit	482
9.4.5.1	Methoden	482
9.4.5.2	„Klassische“ Sonden	483
9.4.5.3	Schalenkreuz und Flügelrad	483
9.4.5.4	Hitzdraht-Anemometer	485
9.4.5.5	Laser-Doppler-Anemometrie	487
9.4.5.6	Particle-Image-Velocimetrie	490
9.4.6	Strömungsgeräusche	492
9.4.6.1	Aufgaben	492
9.4.6.2	Einzelmikrofon	493
9.4.6.3	Kunstkopf	495
9.4.6.4	Akustischer Hohlspiegel	496
9.4.6.5	Reihen-Mikrofone	497
9.5	Sichtbarmachung der Strömung	500
10	Numerische Verfahren	505
10.1	Vollständige Bewegungsgleichungen	506
10.2	Mögliche Vereinfachungen	508
10.3	Lösungsschema	510
10.4	Reibungslose drehungsfreie Strömungen	511
10.4.1	Potentialtheorie	511
10.4.2	Geschlossene Lösungen	512
10.4.3	Panel-und Wirbelleitervverfahren	514

10.5	Reibungslose Strömung mit Drehung	524
10.6	Zähe Strömungen	524
10.6.1	Zeitlich gemittelte Größen	524
10.6.2	Turbulenzmodelle	526
10.6.3	Wandgesetz	527
10.6.4	Beispiel für RANS	528
10.6.5	Large Eddy Simulation	529
10.6.6	Direkte numerische Simulation	534
10.6.7	Lattice-Boltzmann Methode	537
10.7	Zusammengesetzte Modelle	544
10.7.1	Eulergleichungen mit enger Grenzschichtkopplung	544
10.7.2	Erweiterung des „klassischen“ Ansatzes	545
10.7.3	Zonenmodelle	548
10.8	Validierung	548
10.9	Ausblick	551
Literaturverzeichnis		555
Sachwortverzeichnis		587
Namensverzeichnis		593
Abkürzungen		601