

Forschungsberichte Strömungslehre und Aerodynamik

Band 5

C. Tropea

H. Nobach, K. Hufnagel

**Messtechnik II:
Messverfahren und Messgeräte**

2. korrigierte Auflage

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1867-X

ISSN 1610-3114

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Messtechnik II

Messverfahren und Messgeräte

Prof. Dr.-Ing. C. Tropea

Dr.-Ing. H. Nobach

Dr.-Ing. K. Hufnagel

Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik

Technische Universität Darmstadt

Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt

Tel.: +49 6151 16 2854

FAX +49 6151 16 4754

ctropea@sla.tu-darmstadt.de

<http://www.sla.maschinenbau.tu-darmstadt.de>

2006

Inhalt

1 Einführung	8
1.1 Einordnung	8
1.2 Literatur	9
1.2.1 Allg. Messtechnik	9
1.2.2 Sensortechnik	9
1.3 Überblick	10
1.4 Messgrößen	13
1.5 Messbereiche	14
1.5.1 Längenmessbereiche	14
1.5.2 Zeitmessbereiche	15
1.5.3 Geschwindigkeitsmessbereiche	16
1.6 Messaufgaben	17
2 Längen- und Winkelmessung	18
2.1 Messaufgaben	18
2.2 Mechanische Messung	19
2.2.1 Messgeräte	19
2.2.1.1 Strichmaßstab	19
2.2.1.2 Messschieber	20
2.2.1.3 Mikrometerschraube	21
2.2.1.4 Messuhr	22
2.2.1.5 Feste Prüflöhre	23
2.2.1.6 Parallel-Endmaße	24
2.2.1.7 Strich-Winkelmesser	26
2.2.1.8 Schnurlot und Wasserwaage	27
2.2.1.9 Inclinometer (Inklinationsmesser)	28
2.2.2 Digitale Geber	30
2.2.2.1 Kodierte Längen- und Winkel-Messsysteme	30
2.2.2.2 Inkrementale Längen- und Winkel-Messsysteme	32
2.2.2.3 Richtungserkennung und Auflösungsvermögen inkrementaler Längen- und Winkel-Messsysteme	33
2.2.2.4 Verschiedene Maßstäbe (Rastermaßstäbe)	34
2.2.3 Elektrische Geber / Sensoren	35
2.2.3.1 Widerstandsfühler	35
2.2.3.2 Kapazitiver Wegaufnehmer	36
2.2.3.3 Induktiver Wegaufnehmer	37
2.2.3.4 Integrierte Positionsgeber	39
2.3 Ultraschallverfahren	40
2.3.1 Messprinzip	40
2.3.2 Anwendungen	42
2.3.2.1 Zerstörungsfreie Materialprüfung	42
2.3.2.2 Medizinische Diagnostik	43
2.3.2.3 Vermessung von Sedimentschichten	44
2.4 Optische Verfahren	45
2.4.1 Optische Verfahren zur Distanzmessung	46

2.4.1.1	Triangulation	46
2.4.1.2	Interferometrie	51
2.4.1.3	Optisches Radar	52
2.4.1.4	Benutzung modulierten Lichtes	53
2.4.2	Optische Verfahren zur Positionierung	57
2.4.2.1	Lateraleffektdioden	57
2.4.2.2	Spaltsensor	59
2.4.2.3	Schattenverfahren	60
2.4.2.4	Messung der Torsion mit Lichtstrahl-Drehspiegel-Systemen	65
2.4.2.5	Autofokus-Verfahren	67
2.4.2.6	Konfokal-Mikroskopie	76
2.4.3	Optische Verfahren zur 3D-Formerfassung	78
2.4.3.1	Moiré-Verfahren	78
2.4.3.2	Streifenprojektionsverfahren	89
2.4.3.3	Photogrammetrie	94
2.4.3.4	Holographie	103
2.4.3.5	Tomographie	111
2.4.4	Optische Messungen der Oberflächenrauigkeit / -struktur	115
2.4.4.1	Tiefenbereiche an Oberflächen	115
2.4.4.2	Messmethoden	116
2.4.4.3	Glanzverfahren	117
2.4.4.4	Diffuse Streuung	118
2.4.4.5	Ellipsometrie	119
2.5	Raster-Sonden-Mikroskopie	122
2.5.1	Raster-Tunnel-Mikroskopie	123
2.5.2	Raster-Kraft-Mikroskopie	125
2.6	Elektronenmikroskopie	128
2.6.1	Transmissionselektronenmikroskop (TEM)	128
2.6.2	Rasterelektronenmikroskop (REM)	130
2.7	Global Positioning System	132
3-7 Messung von Kraft, Drehmoment, Druck, Masse, Beschleunigung und Schwingung		137
3	Kraftmessung	138
3.1	Mechanische Kraftmessung	138
3.2	Hydraulische Kraftmessung	139
3.3	Elektrische Kraftmessung	140
3.3.1	Messung mit Federkörper	140
3.3.2	Piezoelektrische Kraftaufnehmer	141
3.3.3	Magnetoelastische Kraftaufnehmer	142
3.3.4	Schwingsaitenaufnehmer	144
4	Drehmomentenmessung	145
4.1	Mechanische Drehmomentenmessung	147
4.1.1	Die Kraftmaschine	147
4.1.2	Messung der Torsion einer Welle	148
4.1.2.1	Dehnmessstreifen	148
4.1.2.2	Induktive und kapazitive Drehmomentenmessung	149
4.1.2.3	Drehmomentenmessung nach dem Wirbelstromprinzip	150

4.1.2.4 Drehmomentenmessung nach dem piezoelektrischen Prinzip	151
4.1.2.5 Weitere Verfahren	152
4.2 Elektrische Drehmomentenmessung	153
5 Druckmessung	154
5.1 Mechanische Druckmessung	154
5.1.1 Flüssigkeitsmanometer	154
5.1.2 Druckwaagen, Kolbenmanometer	163
5.1.3 Federmanometer	165
5.2 Elektrische Druckmessung	171
5.2.1 Kapazitiver Druckaufnehmer	172
5.2.2 Induktiver Druckaufnehmer	174
5.2.3 DMS-Druckaufnehmer	176
5.2.4 Piezoresistiver Druckaufnehmer	180
5.2.5 Piezoelektrischer Druckaufnehmer	185
5.2.6 Resonanzfrequenz-Druckaufnehmer	187
5.2.7 Schwingquarz-Druckaufnehmer	188
5.2.8 Oberflächenwellen-Druckaufnehmer	189
5.3 Vielstellen-Druckmessung	190
5.3.1 Vielfachmanometer	190
5.3.2 Scani-Valve	191
5.3.3 Elektronisches Scan-System	193
5.4 Pressure Sensitive Paint (PSP)	194
6 Messung der Masse	198
6.1 Mechanische Waagen	198
6.1.1 Hebelwaagen mit Massenvergleich	199
6.1.2 Neigungswaagen	199
6.1.3 Waagen mit Federeinrichtung	202
6.2 Elektrische Waagen	203
6.2.1 Elektrodynamische Kraftkompensationswägezelle	203
6.2.2 DMS-Wägezelle	204
6.2.3 Ringtorsionswägezelle	204
6.2.4 Weitere elektrische Wägezellen	204
6.3 Interferenzoptische Wägezelle	205
6.4 Hydraulische Wägezelle	205
7 Beschleunigungs- und Schwingungsmessung	206
7.1 Relativbewegungsaufnehmer	207
7.2 Absolutbewegungsaufnehmer	207
7.2.1 Absolutschwingungsmessung	208
7.2.2 Beschleunigungsmessung	210
7.3 Vibrometer	212
8 Dehnmessstreifen (DMS)	216
8.1 Historische Entwicklung der DMS-Technik	216
8.2 Definition der Dehnung	220
8.3 Funktionsprinzip	221
8.4 Materialien für metallische DMS	222
8.5 Bezeichnungen am Dehnmessstreifen	223

8.6 Schichtenaufbau einer DMS-Klebung	224
8.7 DMS-Bauformen	225
8.8 Anwendungsbereiche	227
8.9 Allgemeine Eigenschaften	230
8.10 Elektrische Verschaltung	233
8.11 Schaltungsvarianten von DMS-Brücken	234
8.12 Nullpunkt Korrektur von DMS-Brücken	246
8.13 Temperaturkompensation	249
8.14 Vollständige Kompensation	255
8.15 Applikationstechniken	256
8.16 Halbleiter-DMS	257
9 Durchflussmessung	258
9.1 Volumetrische Durchflussmessung	259
9.1.1 Feste Messkammerwände	259
9.1.2 Bewegliche Messkammerwände	260
9.1.3 Turbinenzähler	261
9.2 Wirkdruck-Verfahren	262
9.2.1 Messprinzip	263
9.2.2 Erweiterung auf kompressible Strömungen	265
9.2.3 Normblende	267
9.2.4 Normdüse	271
9.2.5 Venturidüse	273
9.2.6 Klassisches Venturirohr	275
9.2.7 Kritische Venturidüse	276
9.2.8 Weitere Wirkdruckmessgeräte	278
9.2.9 Druckverlust durch Drosselgeräte	279
9.2.10 Kriterien zur Auswahl des Drosselgerätes	280
9.2.11 Genauigkeit	280
9.3 Kraft-Verfahren (Prallplattendurchflussmesser)	281
9.4 Schwebekörper-Verfahren	282
9.5 Magnetisch-Induktiver Durchflussmesser (MID)	284
9.6 Ultraschall-Durchflussmesser	286
9.6.1 Laufzeitverfahren	286
9.6.2 Doppler-Verfahren	288
9.7 Coriolis-Durchflussmesser	290
9.8 Vortex-Durchflussmesser	292
9.9 Laufzeit-Durchflussmesser	296
9.10 Korrelations-Durchflussmesser	297
9.11 Wärme-Durchflussmesser	298
9.11.1 Wärmetransportverfahren	298
9.11.1.1 Abkühlverfahren	298
9.11.1.2 Konstanttemperaturverfahren	299
9.11.2 Kalorisches Verfahren (Aufheizverfahren)	300
9.12 Vergleich der Durchflussmessverfahren	302
9.12.1 Vergleich verschiedener Messsysteme	302
9.12.2 Grobauswahl von Durchflussmessgeräten für Flüssigkeiten	303
9.12.3 Grobauswahl von Durchflussmessgeräten für Gase	304

10	Temperaturmessung	305
10.1	Temperaturskala und Fixpunkte	305
10.2	Mechanische Berührungsthermometer	308
10.2.1	Metall-Ausdehnungsthermometer	308
10.2.1.1	Stab-Thermometer	308
10.2.1.2	Bimetall-Thermometer	309
10.2.2	Flüssigkeitsthermometer	310
10.2.3	Gasthermometer	312
10.2.4	Dampfdruck-Thermometer	313
10.3	Elektrische Berührungsthermometer	314
10.3.1	Einsatzbereiche elektrischer Berührungsthermometer	314
10.3.2	Thermoelement	315
10.3.3	Metall-Widerstandsthermometer	318
10.3.4	Heißleiter	319
10.3.5	Kaltleiter	321
10.3.6	Silizium-Widerstandstemperatursensor	322
10.3.7	Silizium-Sperrschicht-Temperatursensor	324
10.3.8	Quarztemperatursensor	326
10.4	Thermometer mit optischer Wirkungsweise	327
10.4.1	Faseroptisches Lumineszenzthermometer	327
10.4.2	Thermochrome Flüssigkristalle (Liquid Crystals)	328
10.4.3	LIDAR	330
10.5	Strahlungsthermometer	331
10.5.1	Thermosäule	331
10.5.2	Bolometer	332
10.5.3	Pyroelektrischer Temperatursensor	333
10.5.4	Strahlungspyrometer	336
10.6	Vergleich von Strahlungs- und Berührungsthermometern	337
11	Geschwindigkeitsmessung	338
11.1	Übersicht	338
11.2	Weg-Laufzeit-Verfahren	339
11.2.1	Einzelmessung an Einzelobjekten	339
11.2.2	Tachometer	340
11.2.2.1	Impulstachometer	340
11.2.2.2	Wirbelstromtachometer	341
11.3	Korrelationsverfahren	342
11.4	Kräftegleichgewicht	343
11.4.1	Schalenkreuzanemometer	343
11.4.2	Flügelradanemometer	344
11.4.3	Fluglog (Air-Log)	345
11.5	Ultraschall-Anemometer	346
11.6	Dynamisches Verfahren	348
11.6.1	Grundlagen	348
11.6.2	Messung des statischen Drucks	352
11.6.3	Messung des Gesamtdrucks (Staudruck)	354
11.6.4	Geschwindigkeitssonden	357
11.7	Hitzdraht- / Heißfilntechnik	358
11.7.1	Grundlagen	358

11.7.2 Theorie des Hitzdrahtes	360
11.7.2.1 Wärmeübertragung eines quer angeströmten Zylinders	360
11.7.2.2 Elektrisch zugeführte Energie	361
11.7.2.3 Wärmebilanz des Hitzdrahtes	361
11.7.3 Constant Current Anemometer (CCA)	363
11.7.4 Constant Temperature Anemometer (CTA)	364
11.7.5 Richtungsabhängigkeit	365
11.7.6 Frequenzgang	367
11.7.7 Kalibrierung	368
11.7.7.1 Kalibrierung der Geschwindigkeit	368
11.7.7.2 Kalibrierung der Anströmrichtung	369
11.7.7.3 Korrektur des Temperatureinflusses	369
11.7.7.4 Aufnahme des Frequenzganges	370
11.7.8 Sonden	371
11.8 Laser-Anemometrie	373
11.8.1 Laser-Zwei-Fokus-Verfahren	373
11.8.2 Laser-Doppler-Anemometrie	374
11.9 Bildgebende Verfahren	376
11.9.1 Particle Image Velocimetry	376
11.9.2 Doppler Global Velocimetry	378
12 Messung akustischer Größen	380
12.1 Schallausbreitung	380
12.2 Physikalische Größen des Schalls	381
12.2.1 Schalldruck	381
12.2.2 Lautstärke	384
12.2.3 Lautheit	385
12.2.4 Schallgeschwindigkeit	386
12.2.5 Schallschnelle	386
12.2.6 Schalleistung und Schallintensität	387
12.3 Effektivwerte	389
12.4 Schallpegel	390
12.4.1 Definition	390
12.4.2 Rechnen mit Pegeln	391