

Einführung in das elektrische Messen nichtelektrischer Größen

Dr.-Ing. Herbert Jüttemann

Zweite, neubearbeitete und erweiterte Auflage
des Werks „Grundlagen des elektrischen Messens
nichtelektrischer Größen“

VDI-Verlag GmbH

Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure • Düsseldorf



Inhalt

1. Grundbegriffe der Elektrotechnik	1
1.1. Der Strom	1
1.2. Die elektrische Spannung	2
1.3. Widerstand und Ohmsches Gesetz	3
1.4. Die elektrische Leistung	4
1.5. Die elektrische Arbeit	5
1.6. Der Dauermagnet	5
1.7. Stromdurchflossener Leiter in einem magnetischen Feld.	6
1.8. Der Elektromagnet	7
1.9. Augenblickswerte von Spannungen und Strömen	9
1.10. Elektromagnetische Induktion	9
1.11. Wechselstrom	11
1.12. Wesen der Halbleitung	11
1.13. Der pn-Übergang	13
1.14. Gleichrichter	15
1.15. Zenerdiode	17
2. Der ohmsche Widerstand	19
2.1. Abhängigkeit des Widerstandwertes von der Form und vom Widerstandswerkstoff	19
2.2. Einfache Meßverfahren für Widerstände	20
2.3. Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	21
2.4. Der Übergangswiderstand	22
2.5. Widerstandsausführungen	22
2.6. Reihenschaltung von Widerständen	24
2.7. Parallelschaltung von Widerständen	25
2.8. Der Innenwiderstand der Spannungsquelle	25
2.9. Selbsttätig sich ändernde Widerstände	26
3. Einfache Anzeigeräte	27
3.1. Das Drehspulmeßgerät	27
3.2. Der Strommesser	30

3.3.	Der Spannungsmesser.	30	
3.4.	Galvanometer.	31	
3.5.	Das Quotientenmeßwerk.	32	
3.6.	Sinnbilder für Anzeigergeräte.	34	
3.7.	Empfindlichkeit und Genauigkeit von Meßgeräten.	35	
3.8.	Fehlergrenze einer Meßkette.	36	
3.9.	Analoge und digitale Anzeige.	36	
3.10.	Schreibende Meßgeräte.	38	
	3.10.1. Linienschreiber.	38	
	3.10.2. Punktschreiber.	40	
	3.10.3. Weitere Schreiber.	41	
4.	Widerstände mit stellbaren Abgriffen.	42	
4.1.	Schaltungen zum Herabsetzen von Spannungen.	42	
4.2.	Gesetze des Spannungsteilers.	43	
4.3.	Der Spannungsteiler als Weg- und Winkelgeber.	45	
5.	Wheatstone-Brücke für Gleichspannung	47	
5.1.	Prinzip der Wheatstone-Brücke.	47	
5.2.	Abgleichverfahren	49	;
	5.2.1. Stufenwiderstandsbrücke.	49	
	5.2.2. Schleifdrahtbrücke.	51	;
	5.2.3. Meßbrücken mit selbsttätigem Abgleich.	52	>
5.3.	Ausschlagverfahren.	53	>
5.4.	Ausschalten unerwünschter Einflußgrößen.	59	\
5.5.	Einfluß von Leitungswiderständen.	60	[
	5.5.1. Die Zweileiterschaltung.	60	[
	5.5.2. Dreileiterschaltung.	61	
5.6.	Die Meßkette.	61	
6.	Der Quotientenmesser.	63	
6.1.	Meßprinzip beim Bestimmen von Widerständen.	63	l
6.2.	Zweileiterschaltung.	64	
6.3.	Dreileiterschaltung.	65	•
6.4.	Meßbrücke mit Quotientenmesser.	66	[
6.5.	Quotientenmesser zur Weg- und Winkelmessung.	67	l

7. Widerstandsthermometer und verwandte Meßgeräte	71
7.1. Meßprinzip	71
7.2. Grenztemperaturen	73
7.3. Schützhüllen	73
7.4. Meßaufbau	75
7.5. Heißleitergeber	75
7.6. Das Messen der Luftfeuchte	79
7.7. Das Hitzdraht-Anemometer (Thermoelektrisches Anemometer)	82
7.8. Kaltleiter	84
8. Dehnungsmessung	85
8.1. Allgemeines	85
8.2. Aufbau	85
8.3. Die Dehnungsempfindlichkeit	86
8.4. Temperatureinfluß	87
8.5. Meßanordnungen von Dehnungsstreifen	89
8.5.1. Messen einer Normalspannung	89
8.5.2. Messen einer Biegespannung	91
8.5.3. Torsionsspannung	92
8.6. Widerstandswerte	93
8.7. Strombelastbarkeit	93
8.8. Dehnbarkeit	94
8.9. Kriechen	94
8.10. Grenztemperaturen	94
8.11. Meßschaltung	95
8.12. Einfluß des Leitungswiderstandes	98
8.13. Simulieren von Dehnungen	99
8.14. Halbleiter-Dehnungsmeßstreifen	99
8.15. Anwendung von Dehnungsmeßstreifen in Sensoren	101
8.16. Temperaturkompensation bei einer Kraftmessung über Sensoren	104
9. Kompensatoren	107
9.1. Messen von Quellenspannungen mit einem Spannungsmesser...	107
9.2. Grundschalteung eines Kompensators	108
9.3. Kompensator mit doppelter Kompensation	110
9.4. Selbstableichender Kompensator mit Spannungsteiler	111
9.5. Kompensator mit Strommesser	114
9.6. Koordinaten-Kompensationsschreiber	116

10. Thermoelemente	117
10.1. Prinzip	117
10.2. Die Thermoempfindlichkeit	117
10.3. Die thermoelektrische Spannungsreihe	118
10.4. Drei verschiedene Metalle in einem Stromkreis	120
10.5. Gebräuchliche Thermopaare	122
10.6. Auswahl der Thermopaare	126
10.7. Schutzrohre	128
10.8. Abgleichwiderstand	130
10.9. Ausgleichsleitung	132
10.10. Vergleichsstelle	133
10.10.1. Thermosflasche mit schmelzendem Eis	133
10.10.2. Temperaturkonstanthalter	133
10.10.3. Vergleichsstelle mit Raumtemperatur	133
10.10.4. Kompensationseinrichtung	134
10.11. Thermoketten	135
11. Strahlungspyrometer	136
11.1. Erfassen von Temperaturen durch Wärmestrahlung	137
11.2. Das Strahlungsvermögen	137
11.3. Gesamtstrahlungs-Pyrometer	138
11.4. Bandstrahlungs-Pyrometer	139
11.5. Gemeinsame Merkmale von Gesamtstrahlungs- und Bandstrahlungs-Pyrometern	139
11.6. Teilstrahlungs-Pyrometer	140
11.7. Farbpyrometer	141
12. Verstärkerelemente	143
12.1. Allgemeines	143
12.2. Der bipolare Transistor	143
12.3. Der unipolare Transistor	146
13. Photoelektrische Umformung	151
13.1. Wesen des Lichtes	151
13.2. Beleuchtungsstärke	151
13.3. Lichtempfindlichkeit	151
13.4. Grundarten der Geber	152
13.5. Photoelement	152

13.6.	Photozelle	.154
13.7.	Photowiderstand	.154
13.8.	Photodiode	.156
13.9.	Photo-Transistor	.156
13.10.	Optokoppler	.157
14.	Magnetoelektrische Umformung	.159
14.1.	Hall-Effekt	.159
14.2.	Gauß-Effekt	.160
15.	Elektrisches Feld und Kondensator	.161
15.1.	Das elektrische Feld zwischen zwei ebenen Platten	.161
15.2.	Analogon des Kondensators	.162
15.3.	Die Kapazität	.163
15.3.1.	Kapselkondensator	.163
15.3.2.	Elektrischer Kondensator	.163
15.3.3.	Bestimmung der Kapazität	.164
15.4.	Die allgemeine Kondensatorgleichung	.164
15.5.	Schaltung von Kondensatoren	.165
15.6.	Kondensatoraufladung	.166
15.7.	Kondensatorentladung	.167
16.	Piezoelektrische Umformung	.169
16.1.	Wesen	.169
16.2.	Abhängigkeit zwischen Kraft und Spannung	.170
16.3.	Einfluß der im Meßkreis vorhandenen Kapazitäten und Ableitwiderstände	.170
16.4.	Abschirmung	.171
16.5.	Anforderungen an den Verstärkereingang	.172
16.6.	Anwendungen	.172
17.	Elektromagnetische Induktion und Induktivität	.174
17.1.	Entstehung eines Magnetfeldes auf Grund eines Stromes	... 174
17.2.	Durch ein Fremdfeld induzierte Spannung in einer Spule	... 174
17.3.	Selbstinduktion	.175
17.4.	Die Induktivität	.176
17.5.	Der magnetische Widerstand	.177
17.6.	Spule ohne Eisenkern	.178

17.7.	Spule mit Eisenkern	179
17.8.	Spule mit unterbrochenem Eisenkern	180
17.9.	Schaltzeichen	180
17.10.	Anlegen einer Induktivität an eine konstante Spannung	181
17.11.	Analogon einer Induktivität	182
17.12.	Induktivitäten weiterer Leiterformen	183
18.	Grundgesetze des Wechselstroms	184
18.1.	Erzeugen einer Wechselspannung	184
18.2.	Der Effektivwert	186
18.3.	Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis	187
18.4.	Kapazität in einem Wechselstromkreis	188
18.5.	Induktivität im Wechselstromkreis	190
18.6.	Gekoppelte Induktivitäten	192
18.7.	Der Schwingkreis	194
18.8.	Spannungsteiler für Wechselgrößen	198
19.	Wechselstrom-Meßbrücken	199
19.1.	Mit Wechselspannung betriebene Wheatstone-Brücke	199
19.2.	Kondensator in einem Brückenweig	200
19.3.	Ein Spannungsteiler der Brücke besteht aus zwei Kondensatoren	202
19.4.	Ein Spannungsteiler der Brücke besteht aus zwei Scheinwiderständen	203
19.5.	Einfache Kapazitätsmeßbrücken	205
19.6.	Eliminieren von Schaltkapazitäten	206
19.7.	Transformatorbrücken	208
19.8.	Induktivitätsmeßbrücken	209
	19.8.1. Abgleichbedingungen für Induktivitätsmeßbrücken	209
	19.8.2. Brücke mit doppeltem Abgleich	211
19.9.	Trägerfrequenz-Meßbrücken	212
	19.9.1. Amplitudenmodulation	212
	19.9.2. Demodulation durch Einfachgleichrichtung	213
	19.9.3. Phasenempfindliche Demodulation	214
	19.9.4. Gesamtschaltung der Trägerfrequenzmeßbrücke	218
20.	Kapazitive Geber	222
20.1.	Kapazität eines Plattenkondensators	222
20.2.	Abstandsänderung der Platten	222

20.3.	Platten Verschiebung in Längsrichtung	226
20.4.	Verschiebung des Dielektrikums parallel zur Belageebene	229
20.5.	Verschiebung des Dielektrikums quer zur Belageebene.	232
20.6.	Veränderungen des Dielektrikums.	232
20.6.1.	Messung des Wassergehalts von nichtleitenden Stoffen.	232
20.6.2.	Feuchtemessung.	233
20.6.3.	Durchsatzmessung von granuliertem Fördergut	234
20.7.	Meßschaltungen.	234
20.7.1.	Allgemeines.	234
20.7.2.	Spannungsteiler.	236
20.7.3.	Meßbrücken.	236
20.7.4.	Messung mit Schwingkreis.	237
20.7.5.	Meßschaltungen mit Frequenzmodulation.	238
20.8.	Beurteilung der kapazitiven Geber.	240
21.	Induktive Geber.	241
21.1.	Meßprinzip des Tauchankergebers.	241
21.2.	Differential-Tauchankergeber.	242
21.3.	Tauchankergeber als Differentialtransformator.	243
21.4.	Querankergeber.	245
21.5.	Meßschaltung für induktive Geber.	247
21.6.	Schichtdickengeber.	248
21.7.	Unwuchtgeber.	249
21.8.	Beurteilung der Tauch-und Querankergeber.	249
21.9.	Impulsgeber.	249
21.10.	Der magnetoelastische Umformer.	250
21.11.	Kurzschlußring-Geber.	251
21.12.	Schwingkreis-Impulsgeber.	252
22.	Drehmelder und elektrische Welle.	254
23.	Induktionsgeber.	259
23.1.	Elektrodynamische Geber für Lineargeschwindigkeiten	259
23.1.1.	Elektromagnetische Induktion beim geradlinig bewegten Leiter.	259
23.1.2.	Geber mit Topfmagnet.	260
23.1.3.	Schwinggeschwindigkeit.	262

23.1.4.	Schwingbeschleunigung	262	
23.1.5.	Schwingweg	263	
23.2.	Elektrodynamische Geber für Winkelgeschwindigkeiten	264	
23.3.	Elektromagnetische Impulsgeber	265	
23.4.	Elektromagnetischer Abstandsgeber	267	
24.	Meßverstärker	268	
24.1.	Allgemeines	268	
24.2.	Verstärker als geschlossene Einheit	269	^
24.3.	Nullpunktdrift	269	I
24.4.	Modulationsverstärker	270	[
24.5.	Beeinflussung des Verstärkungsfaktors	271	\
24.6.	Gegengekoppelte Verstärker	271	f
24.7.	Trägerfrequenz-Verstärker	274	j
24.8.	Rauschen	275	j
24.9.	Fremdspannungen auf Grund von Magnetfeldern	275	
24.10.	Fremdspannungen auf Grund elektrischer Felder	276	
25.	Schnellschreiber, Oszillographen und Oszilloskope	278	
25.1.	Allgemeines	278	
25.2.	Schnellschreiber mit körperlichem Schreibarm	279	
25.3.	Digitaler Schnellschreiber	279	
25.4.	Flüssigkeitsstrahl-Oszillograph	281	
25.5.	Elektronenstrahl-Oszilloskop	283	
25.5.1.	Erzeugen des Elektronenstrahls	283	
25.5.2.	Ablenkung des Elektronenstrahls	283	
25.5.3.	Verstärker	284	
25.5.4.	Lissajousfiguren	284	
25.5.5.	Nullindikator	284	
25.5.6.	Schreiben periodischer Vorgänge	285	
25.5.7.	Synchronisierspannung	287	
25.5.8.	Triggerung	287	
25.5.9.	Weitere Darstellungsmöglichkeiten	287	
25.5.10.	Elektronenschalter	288	
26.	Meßumformer mit Kraftvergleich	290	
26.1.	Stromwaage	290	
26.2.	Umformen von Drehmomenten	292	
26.3.	Kompensator mit Stromwaage	293	

27. Winkelgeber	295
27.1. Allgemeines	295
27.2. Winkelgeber mit Schwenkspule	295
27.3. Winkelgeber nach dem Kompensationsprinzip	296
27.4. Inkrementale Winkelgeber	297
27.5. Digitale Winkelgeber	298
28. Durchflußmessung	299
28.1. Wirkdruckverfahren	299
28.2. Induktive Durchflußmessung	299
28.3. Wirbelfrequenz-Durchflußmessung (Vortex-Durchfluß-	
messung)	303
28.4. Ringkolbenzähler	304
29. Flüssigkeitsanalyse	307
29.1. Messung des pH-Wertes	307
29.1.1. Allgemeines	307
29.1.2. Meßprinzip	309
29.1.3. Elektroden	310
29.1.4. Meßeinrichtung	313
29.2. Messung von in Wasser gelöstem Sauerstoff	315
30. Gasanalyse	317
30.1. Allgemeines	317
30.2. Wärmeleit-Gasanalysatoren	317
30.3. Magnetische Gasanalysegeräte	318
30.4. Infrarot-Absorption	320
31. Ionisierende Strahlung	324
31.1. Strahlungsarten	324
31.2. Anwendungen	324
31.3. Strahlungsquellen	325
31.4. Meßeinrichtung	325
31.5. Ionisationskammer	327
31.6. Proportional-Zählrohr	329
31.7. Auslösezählrohr oder Geiger-Müller-Zählrohr	329
31.8. Szintillationszähler	330
31.9. Halbleiterzähler	330

31.10.	Dickenmessung	331
31.11.	Messen der Auftragsdicke von Lacküberzügen oder metallischen Überzügen	332
31.12.	Füllstandsmessung	332
32.	Digitale Meßtechnik	333
32.1.	Analoge und digitale Anzeige	333
32.2.	Kodierung	333
32.3.	Lineal-und Scheibenkodierer	334
32.4.	Analog-Digital-Wandler	336
32.5.	Fernmessung	338
32.6.	Meßwertspeicher	340
32.7.	Auswertung mit einem Mikroprozessor oder Computer	340
32.8.	Digital-Analog-Wandlung	341
32.9.	Dual-Dezimal-Wandlung	342
32.10.	Sieben-Segment-Anzeige	343
32.11.	Digitale Impuls-und Frequenz-Messung	345
33.	Einfache Regelungsvorgänge	346
33.1.	Aufgabe der Regelung	346
33.2.	Grundbegriffe	346
33.3.	Beispiel einer Regelung	347
33.4.	Regelkreis	348
33.5.	Proportionalbereich	349
33.6.	Die bleibende Abweichung	350
33.7.	Umfang des Reglers	351
33.8.	Gasdruckregelung als Beispiel eines P-Reglers	352
33.9.	Der I-Regler	352
33.10.	Regelstrecken mit und ohne Ausgleich	354
33.11.	Vergleich von P-und I-Regler	354
33.12.	Der elektrische Regler	355
33.13.	Selbstabgleichende Wheatstonebrücke	357
33.14.	Selbstabgleichender Kompensator	357
33.15.	Der Zweipunktregler	358
33.16.	Der Dreipunktregler	359
34.	Schrifttum	361
35.	Sachwortverzeichnis	364