

# Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie

Grundlagen und Anwendungen

VON

DR.-ING. HERIBERT KAHMEN<sup>0</sup>

Mit 331 Abbildungen



HERBERT WICHMANN VERLAG KARLSRUHE

1977

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
	<b>Teil I: Grundlagen der Elektronik</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Einige wichtige Grundlagen der Gleich- und Wechselstrom- technik</b>	<b>3</b>
2.1	Aktive und passive Zweipole und elektrische Netzwerke	3
2.1.1	Aktive Zweipole	3
2.1.2	Passive Zweipole	4
2.1.3	Stromkreis	6
2.1.4	Wirkschaltpfan, Stromlaufplan, Blockschaltpbild	6
2.2	Berechnung von Gleichstromnetzen	7
2.2.1	Kirchhoffsche Regeln	7
2.2.2	Spannungsteiler (Potentiometer), belasteter Spannungsteiler	9
2.2.3	Parallelwiderstände	12
2.2.4	Wheatstonesche Meßbrücke, Nullabgleich, Ausschlagverfahren	12
2.3	Anwendungen: Elektrische Temperaturmessung im Zusammenhang mit der elektronischen Entfernungsmessung	15
2.4	Nennleistung, Leistungsanpassung	16
2.4.1	Berücksichtigung der Nennleistung und Nennspannung beim Einsatz elektronischer Geräte	16
2.4.2	Nutzung von Spannungsquellen, Leistungsanpassung	17
2.5	Wechselströme, Wechselspannungen	20
2.5.1	Periodische Schwingungen, harmonische Schwingungen	20
2.5.2	Die Zeigerbilddarstellung des Wechselstroms	21
2.5.3	Die komplexe Berechnung	24

2.6	Wechselstromgrößen	27
2.6.1	Wechselstromwiderstand, Wechselstromleitwert	27
2.6.2	Wechselstromwiderstände: Wirkwiderstand, induktiver Widerstand, kapazitiver Widerstand	28
2.7	Berechnung von Wechselstromnetzen	30
2.7.1	Kirchhoffsche Regeln, Reihenschaltung, Parallelschaltung	30
2.7.2	Wheatstonesche Wechselstrombrücke	31
2.8	Erzeugung und Filterung von Frequenzen	31
2.8.1	Resonanz	31
2.8.2	Erzeugung von elektrischen Schwingungen	38
2.8.3	Filter	39
2.9	Modulation harmonischer Schwingungen	41
2.9.1	Amplitudenmodulation	42
2.9.2	Frequenzmodulation	43
2.10	Phasenschieber	45
2.10.1	Resolver als Phasenschieber	45
<b>3</b>	<b>Halbleiterelektronik</b>	<b>50</b>
3.1	Leitungsmechanismen	50
3.1.1	Das Bändermodell der Leiter, Halbleiter und Isolatoren	50
3.1.2	Elektrische Leitfähigkeit, Driftstrom, Diffusionsstrom	52
3.1.3	Eigenleitung	53
3.1.4	Unipolares und bipolares Stromverhalten	54
3.1.5	Störleitung: p-Leitung, n-Leitung	55
3.2	Die Halbleiterdiode	57
3.2.1	Der pn-Übergang	57
3.2.2	Der pn-Übergang als Gleichrichter	58
3.2.3	Die Z-Diode	60
3.2.4	Gleichrichtung von Wechselspannungen	60
3.2.5	Phasendetektoren	61

3.3	Vom Transistor zur integrierten Schaltung	63
3.3.1	Funktionsprinzip der npn- bzw. pnp-Transistoren	63
3.3.2	Feldeffekt-Transistoren (FET)	69
3.3.3	Operationsverstärker	71
3.3.4	Integrierte Schaltungen	75
3.4	Schwingungserzeugung durch Quarzoszillatoren	77
3.4.1	Grundprinzip	77
3.4.2	Frequenzstabilität	78
3.5	Frequenztransformation: Frequenzvervielfachung, Mischstufen	82
3.6	Demodulation	85
3.6.1	Demodulation amplitudenmodulierter Signale	85
3.6.2	Demodulation frequenzmodulierter Signale	86
<b>4</b>	<b>Optoelektronik</b>	<b>91</b>
4.1	Inkohärente Strahlungssender	91
4.1.1	Thermische Strahler	91
4.1.2	Nichtthermische Strahler	91
4.1.3	Lumineszenzdiolen (Sub-Laser)	92
4.2	Kohärente Strahlungssender, Laser	94
4.2.1	Kohärenz	94
4.2.2	Absorption, Emission und Verstärkung bei der Laserstrahlung	95
4.2.3	Vom Laserverstärker zum Laseroszillator	98
4.2.4	Festkörper-Laser	99
4.2.5	Gas-Laser	102
4.2.6	Halbleiter-Laser	104

4.3	Strahlungsmodulation	105
4.3.1	Direkte Modulation	105
4.3.2	Indirekte Strahlungsmodulation kontinuierlicher Strahlungsquellen	105
4.3.3	Pockels-Effekt, Kerr-Effekt	106
4.3.4	Amplitudenmodulation von Licht mit Hilfe des linearen elektrooptischen Effektes (KDP-, ADP-Modulatoren)	108
4.3.5	Amplitudenmodulation des Lichtes mit Hilfe des quadratischen elektrooptischen Effektes (Kerrzellen-Modulatoren)	114
4.3.6	Ultraschall-Modulatoren	116
4.3.7	Modulationsverfahren für Impulslaser	116
4.4	Fotodetektoren	119
4.4.1	Der äußere lichtelektrische Effekt, Vakuum-Fotodioden, Sekundärelektronenvervielfacher	120
4.4.2	Der innere lichtelektrische Effekt, Halbleiter-Fotodioden ohne und mit Sperrschicht	124
4.4.3	Fotoelemente	126
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Digitaltechnik</b>	<b>130</b>
5.1	Analoge und binäre Signale	130
5.2	Zahlen-Codes in digitalen Meßgeräten	131
5.3	Logik-Schaltungen	133
5.3.1	Logische Gatter	133
5.3.2	Elektronische Speicher	137
5.3.3	Zählelemente	138
5.4	Elektronische Zähler, Frequenzteiler	139
5.4.1	Dualzähler, Frequenzteiler, Vor-Rückwärts-Zähler	139
5.4.2	Dual-dekadische Zähler	141
5.4.3	Prinzip des digitalen Phasenmeßtorsystems	142
5.4.4	Codeumsetzung	144

5.5	Analog-Digital-Umsetzer	145
5.5.1	Der Schmitt-Trigger	145
5.5.2	Winkel- und Streckenmessung nach dem Code-Abtastverfahren	146
5.5.3	Winkel- und Streckenmessung nach dem Inkremental- oder Zählverfahren	147
5.5.4	Vertikalwinkelmessung über Widerstandsmessungen	151
5.6	Digitale integrierte Bausteine	154
<b>6</b>	<b>Mikrowellenelektronik</b>	<b>156</b>
6.1	Elektrische Resonatoren	156
6.1.1	Lecherleitung	156
6.1.2	$\lambda/4$ -Resonatoren und $\lambda/2$ -Resonatoren in der Koaxialleitertechnik	162
6.2	Erzeugung, Verstärkung und Modulation von Mikrowellen	163
6.2.1	Das Klystron	163
6.2.2	Das Reflexklystron	165
6.2.3	Gunn-Oszillatoren, Lawinenlaufzeit-Dioden-Oszillatoren	165
6.3	Abstrahlung und Ausbreitung von Mikrowellen	166
6.3.1	Antennen	166
6.3.2	Bodenreflexionen	169
	<b>Teil II: Meßprinzipien</b>	<b>175</b>
<b>7</b>	<b>Prinzipien der elektronischen Entfernung- und Entfernungsdifferenzmessungen</b>	<b>175</b>
7.1	Entfernungsdifferenzmessung durch Interferenz	175
7.1.1	Interferenz	175
7.1.2	Michelson Interferometer	177

7.2	Elektronische Entfernungsmessung mit Phasenvergleichsverfahren	178
7.2.1	Entfernungsmessung mit passivem Reflektor, dargestellt am Beispiel der elektrooptischen Entfernungsmessung	178
7.2.2	Entfernungsmessung mit aktiver Gegenstation, dargestellt am Beispiel der Mikrowellenentfernungsmessung	180
7.2.3	Direkte Erzeugung der Grobmaßstäbe	182
7.2.4	Indirekte Erzeugung der Grobmaßstäbe mit festen Frequenzen	183
7.2.5	Indirekte Erzeugung der Grobmaßstäbe mit variablen Frequenzen	187
7.2.6	Methoden der Phasenvergleichsmessung	189
7.2.7	Physikalische Realisierung der Entfernungsmessverfahren	192
7.3	Simultane Entfernungsmessung mit zwei oder drei Trägern	194
7.4	Prinzip der Impulsentfernungsmessung	199
7.5	Entfernungsdifferenzmessungen mit Hilfe des Dopplereffektes	200
	<b>Teil III: Instrumentelle Entwicklungen und Meßverfahren</b>	<b>204</b>
<b>8</b>	<b>Übertragung von Richtungen mit Lasern</b>	<b>204</b>
8.1	Verwendung von Lasern bei der Fluchtungsprüfung und -steuerung sowie beim Nivellement	204
<b>9</b>	<b>Ausmessung kleiner Längen-, Höhen- und Neigungsänderungen durch Umwandlung in elektrische Größen (Spannung, Strom, Frequenz...) für Anwendungen in der Ingenieurvermessung</b>	<b>210</b>
9.1	Meßgrößenumwandlung mit Dehnungsmeßstreifen	212
9.2	Meßgrößenumwandlung mit induktiven Gebern	215
9.3	Meßgrößenumformung mit kapazitiven Gebern	221
9.4	Meßgrößenumformung mit Schwingsaitengebern	224
9.5	Meßgrößenumformung mit elektrooptischen Meßwertgebern	226

9.6	Messung kleiner Neigungsänderungen mit elektronischen Libellen	228
9.7	Anwendungen in der Ingenieurvermessung	229
<b>10</b>	<b>Laser Interferometer</b>	<b>235</b>
10.1	Die Meter-Definition, sekundäre Längennormale	235
10.2	Laser-Interferometer mit direkter Zählung der Interferenzstreifen	235
10.3	Laser-Doppler-Interferometer	241
<b>11</b>	<b>Elektrooptische Entfernungsmesser, die mit dem Phasenvergleichsverfahren arbeiten und elektronische Tachymeter</b>	<b>250</b>
11.1	Allgemeine Grundlagen	250
11.2	Ursprüngliche Entwicklungen	251
11.3	Elektrooptische Entfernungsmesser großer und mittlerer Reichweite	254
11.3.1	Elektrooptische Entfernungsmesser mit hochfrequentem Phasenvergleichsverfahren	254
11.3.2	Elektrooptische Entfernungsmesser mit niederfrequentem Phasenvergleichsverfahren	258
11.4	Entfernungsmesser, die simultan mit zwei oder drei Trägern arbeiten	264
11.5	Nahbereichsentfernungsmesser	270
11.5.1	Geräte mit analoger Phasenmessung	273
11.5.2	Geräte mit digitaler Phasenmessung	283
11.5.3	Kriterien für den praktischen Einsatz der Nahbereichsentfernungsmesser	291

11.6	Genauigkeitskriterien elektrooptischer Entfernungsmesser	293
11.6.1	Einfluß von Fehlern des für die Strecke repräsentativen Brechungsindex	293
11.6.2	Einfluß von Fehlern der Modulationsfrequenz	296
11.6.3	Zyklische Phasenfehler	296
11.6.4	Phasenheterogenität der Strahlungssender und Photodetektoren	300
11.6.5	Einfluß der Signalstärke	301
11.6.6	Einfluß der Betriebsspannung	302
11.6.7	Prüfung des Gerätenullpunktes	303
11.7	Registrierende elektronische Tachymeter	306
11.7.1	Ursprüngliche Entwicklungen	306
11.7.2	Registrierende elektronische Tachymeter, die für die Winkelmessung ein Code-Abtast- oder Inkrementalverfahren und für die Streckenmessung ein Phasenvergleichsverfahren nutzen	307
<b>12</b>	<b>Mikrowellenentfernungsmesser</b>	<b>322</b>
12.1	Allgemeine Grundlagen	322
12.2	Die Tellurometer	322
12.3	Weitere Mikrowellenentfernungsmesser, die nach dem Tellurometerprinzip arbeiten	330
12.4	Genauigkeit der Mikrowellenmessungen	336
<b>13</b>	<b>Positionsbestimmung auf dem Meer</b>	<b>341</b>
13.1	Anwendungsgebiete der Positionsbestimmung und die unterschiedlichen Anforderungen	341
13.2	Verfahren der Positionsbestimmung	342
13.2.1	Funkortungsverfahren	342
13.2.2	Weitere Verfahren für die Positionsbestimmung	358

<b>14</b>	<b>Richtungs-, Entfernungs- und Entfernungsdifferenzmessungen zu extraterrestrischen Hochzielen</b>	360
14.1	Beobachtungsmethoden und Beobachtungsverfahren der Satellitengeodäsie	360
14.1.1	Laserimpulsentfernungsmessungen	361
14.1.2	Dopplermessungen	365
14.1.3	Geodätische Weltnetze	372
14.2	Laserimpulsentfernungsmessung zum Mond	373
14.3	Very Long Baseline Interferometry (VLBI)	373
<b>15</b>	<b>Anhang</b>	379
A.	Meteorologische und geometrische Reduktionen elektronisch gemessener Strecken	380
B.	Tabellen	384
<b>16</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b>	402