

# Übungsaufgaben zur Messtechnik und Sensorik

G. Lebelt und F. Puente León



Berichte über Verteilte Messsysteme

Band 2

**Gerhard Lebelt, Fernando Puente León**

**Übungsaufgaben zur Messtechnik und Sensorik**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7110-7

ISSN 1864-6379

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>9</b>
<b>I Aufgaben</b>	<b>11</b>
<b>1 Messtechnische Grundlagen</b>	<b>13</b>
1.1 Maßeinheiten . . . . .	13
1. Rechnung mit Einheiten . . . . .	13
2. Kostenberechnung . . . . .	13
1.2 Beschreibung linearer Systeme . . . . .	13
3. Zeitverhalten eines Tiefpass-Messgliedes . . . . .	13
4. Zeitverhalten eines Hochpass-Messgliedes . . . . .	14
5. Frequenzverhalten eines Tiefpass-Messgliedes . . . . .	15
6. Frequenzverhalten eines Hochpass-Messgliedes . . . . .	16
1.3 Messfehler . . . . .	18
7. Messung der Leerlaufspannung einer Spannungsquelle	18
8. Messfehler bei einer Widerstandsmessung 1 . . . . .	18
9. Messfehler bei einer Widerstandsmessung 2 . . . . .	19
10. Messfehler bei einer Durchflussmessung . . . . .	19
11. Berechnete Messgröße . . . . .	20
12. Messfehler und Messunsicherheit . . . . .	21
13. Messdatenauswertung . . . . .	21
14. Prozesskontrolle . . . . .	22
<b>2 Schaltungstechnische Grundlagen</b>	<b>23</b>
2.1 Messbrücken . . . . .	23
15. Ausschlag-Widerstandsmessbrücke . . . . .	23
16. Fehlereinflüsse bei einer Wheatstone-Brücke . . . . .	25
17. Induktivitätsmessbrücke . . . . .	26
2.2 Messverstärker . . . . .	27
18. Messverstärker zur Messung von Spannungen . . . . .	27

19.	Spannungsverstärker mit Stromausgang . . . . .	29
20.	Anpassung eines Messwerkes . . . . .	31
21.	Subtrahierender Messverstärker . . . . .	31
22.	Integrationsverstärker . . . . .	33
23.	Differenzierverstärker . . . . .	34
24.	Messverstärkerschaltung für Widerstandsthermometer	35
<b>3</b>	<b>Messung elektrischer Größen</b>	<b>37</b>
3.1	Messung von Strom und Spannung . . . . .	37
25.	Spannungsquelle . . . . .	37
26.	Analyse eines Sensors . . . . .	37
27.	Messbereichserweiterung 1 . . . . .	38
28.	Messbereichserweiterung 2 . . . . .	39
29.	Vielfachmessinstrument mit Strom- und Spannungs- bereichsumschaltung (Multivisaltung) . . . . .	40
30.	Kenngrößen von Wechselsignalen . . . . .	41
3.2	Widerstandsmessung . . . . .	42
31.	Strom- und spannungsrichtige Messschaltung . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Messinstrumente</b>	<b>45</b>
4.1	Drehspulmesswerk . . . . .	45
32.	Drehspulmesswerk . . . . .	45
4.2	Oszilloskop . . . . .	47
33.	Elektronenstrahllosziloskop . . . . .	47
34.	Frequenzkompensierter Spannungsteiler (Tastkopf) . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Analoge Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>51</b>
5.1	Mechanische Größen . . . . .	51
35.	Messbrücke für Dehnungsmessstreifen . . . . .	51
36.	Dehnungsmessung mit Temperaturkompensation . . . . .	52
37.	Linearisierung bei einer DMS-Halbbrücke . . . . .	54
38.	Piezoelektrische Kraftsensoren . . . . .	54
39.	Piezoelektrische Kraftmessung . . . . .	55
5.2	Temperatur . . . . .	57
40.	Auslegung eines Widerstandsthermometers . . . . .	57
41.	NTC-Widerstandsthermometer (Heißeleiter) . . . . .	58
42.	Temperaturmessung mit Thermoelement und Ver- gleichsstelle . . . . .	58

43.	Temperaturmessung mit Thermoelement und Kompensationsdose . . . . .	59
44.	Messung von Differenztemperaturen mit zwei Thermoelementen . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Digitale Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>63</b>
6.1	Grundlagen der Digitaltechnik . . . . .	63
45.	Antivalenzgatter . . . . .	63
46.	Logische Schaltungen . . . . .	64
47.	Bistabile Kippstufen . . . . .	64
6.2	Zeit- und Frequenzmessung . . . . .	65
48.	Digitale Messung der Periodendauer . . . . .	65
49.	Digitaler Universalzähler . . . . .	66
50.	Digitale Geschwindigkeitsmessung . . . . .	68
6.3	Längenmessung . . . . .	70
51.	Inkrementaler Längengeber . . . . .	70
52.	Absolut codierte Längenmaßstäbe . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Umsetzer</b>	<b>73</b>
7.1	Digital/Analog-Umsetzer . . . . .	73
53.	Konzept eines einfachen Digital/Analog-Umsetzers . . . . .	73
54.	Digital/Analog-Umsetzer mit Kettenleiter . . . . .	74
7.2	Analog/Digital-Umsetzer . . . . .	74
55.	Allgemeine Fragen . . . . .	74
56.	Kennlinien von Analog/Digital-Umsetzern . . . . .	75
57.	Signal/Rausch-Verhältnis und effektive Bits . . . . .	76
58.	Nachlaufumsetzer . . . . .	77
59.	Umsetzer mit sukzessiver Approximation . . . . .	78
60.	Parallel-Umsetzer (Flash-Umsetzer) . . . . .	78
61.	Zweirampen-A/D-Umsetzer (Dual-slope-ADU) . . . . .	79
62.	Delta-Sigma-Umsetzer . . . . .	81
<b>8</b>	<b>Digitale Verarbeitung von Messsignalen</b>	<b>83</b>
8.1	Digitale Signale . . . . .	83
63.	Bilddigitalisierung . . . . .	83
64.	Übertragung digitaler Signale . . . . .	83
8.2	Signalverarbeitung . . . . .	84
65.	Faltungsintegral . . . . .	84

66.	Fourier-Transformation . . . . .	84
67.	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	85
68.	Filterung von Bildsignalen . . . . .	85
<b>II</b>	<b>Lösungen</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Messtechnische Grundlagen</b>	<b>89</b>
9.1	Maßeinheiten . . . . .	89
1.	Rechnung mit Einheiten . . . . .	89
2.	Kostenberechnung . . . . .	90
9.2	Beschreibung linearer Systeme . . . . .	90
3.	Zeitverhalten eines Tiefpass-Messgliedes . . . . .	90
4.	Zeitverhalten eines Hochpass-Messgliedes . . . . .	93
5.	Frequenzverhalten eines Tiefpass-Messgliedes . . . . .	96
6.	Frequenzverhalten eines Hochpass-Messgliedes . . . . .	101
9.3	Messfehler . . . . .	105
7.	Messung der Leerlaufspannung einer Spannungsquelle	105
8.	Messfehler bei einer Widerstandsmessung 1 . . . . .	106
9.	Messfehler bei einer Widerstandsmessung 2 . . . . .	107
10.	Messfehler bei einer Durchflussmessung . . . . .	108
11.	Berechnete Messgröße . . . . .	109
12.	Messfehler und Messunsicherheit . . . . .	111
13.	Messdatenauswertung . . . . .	113
14.	Prozesskontrolle . . . . .	116
<b>10</b>	<b>Schaltungstechnische Grundlagen</b>	<b>119</b>
10.1	Messbrücken . . . . .	119
15.	Ausschlag-Widerstandsmessbrücke . . . . .	119
16.	Fehlereinflüsse bei einer Wheatstone-Brücke . . . . .	127
17.	Induktivitätsmessbrücke . . . . .	132
10.2	Messverstärker . . . . .	134
18.	Messverstärker zur Messung von Spannungen . . . . .	134
19.	Spannungsverstärker mit Stromausgang . . . . .	140
20.	Anpassung eines Messwerkes . . . . .	146
21.	Subtrahierender Messverstärker . . . . .	148
22.	Integrationsverstärker . . . . .	152
23.	Differenzierverstärker . . . . .	157



24. Messverstärkerschaltung für Widerstandsthermometer	161
<b>11 Messung elektrischer Größen</b>	<b>163</b>
11.1 Messung von Strom und Spannung . . . . .	163
25. Spannungsquelle . . . . .	163
26. Analyse eines Sensors . . . . .	163
27. Messbereichserweiterung 1 . . . . .	165
28. Messbereichserweiterung 2 . . . . .	166
29. Vielfachmessinstrument mit Strom- und Spannungsbereichsumschaltung (Multivisichaltung) . . . . .	168
30. Kenngrößen von Wechselsignalen . . . . .	172
11.2 Widerstandsmessung . . . . .	180
31. Strom- und spannungsrichtige Messschaltung . . . . .	180
<b>12 Messinstrumente</b>	<b>183</b>
12.1 Drehspulmesswerk . . . . .	183
32. Drehspulmesswerk . . . . .	183
12.2 Oszilloskop . . . . .	188
33. Elektronenstrahloszilloskop . . . . .	188
34. Frequenzkompensierter Spannungsteiler (Tastkopf) . . . . .	191
<b>13 Analoge Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>195</b>
13.1 Mechanische Größen . . . . .	195
35. Messbrücke für Dehnungsmessstreifen . . . . .	195
36. Dehnungsmessung mit Temperaturkompensation . . . . .	199
37. Linearisierung bei einer DMS-Halbbrücke . . . . .	200
38. Piezoelektrische Kraftsensoren . . . . .	202
39. Piezoelektrische Kraftmessung . . . . .	209
13.2 Temperatur . . . . .	215
40. Auslegung eines Widerstandsthermometers . . . . .	215
41. NTC-Widerstandsthermometer (Heißleiter) . . . . .	217
42. Temperaturmessung mit Thermoelement und Vergleichsstelle . . . . .	220
43. Temperaturmessung mit Thermoelement und Kompensationsdose . . . . .	222
44. Messung von Differenztemperaturen mit zwei Thermoelementen . . . . .	225

<b>14</b>	<b>Digitale Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>227</b>
14.1	Grundlagen der Digitaltechnik . . . . .	227
45.	Antivalenzgatter . . . . .	227
46.	Logische Schaltungen . . . . .	227
47.	Bistabile Kippstufen . . . . .	229
14.2	Zeit- und Frequenzmessung . . . . .	230
48.	Digitale Messung der Periodendauer . . . . .	230
49.	Digitaler Universalzähler . . . . .	231
50.	Digitale Geschwindigkeitsmessung . . . . .	239
14.3	Längenmessung . . . . .	242
51.	Inkrementaler Längengeber . . . . .	242
52.	Absolut codierte Längenmaßstäbe . . . . .	245
<b>15</b>	<b>Umsetzer</b>	<b>249</b>
15.1	Digital/Analog-Umsetzer . . . . .	249
53.	Konzept eines einfachen Digital/Analog-Umsetzers . . . . .	249
54.	Digital/Analog-Umsetzer mit Kettenleiter . . . . .	250
15.2	Analog/Digital-Umsetzer . . . . .	251
55.	Allgemeine Fragen . . . . .	251
56.	Kenmlinien von Analog/Digital-Umsetzern . . . . .	253
57.	Signal/Rausch-Verhältnis und effektive Bits . . . . .	256
58.	Nachlaufumsetzer . . . . .	258
59.	Umsetzer mit sukzessiver Approximation . . . . .	260
60.	Parallel-Umsetzer (Flash-Umsetzer) . . . . .	261
61.	Zweirampen-A/D-Umsetzer (Dual-slope-ADU) . . . . .	265
62.	Delta-Sigma-Umsetzer . . . . .	267
<b>16</b>	<b>Digitale Verarbeitung von Messsignalen</b>	<b>273</b>
16.1	Digitale Signale . . . . .	273
63.	Bilddigitalisierung . . . . .	273
64.	Übertragung digitaler Signale . . . . .	274
16.2	Signalverarbeitung . . . . .	274
65.	Faltungsintegral . . . . .	274
66.	Fourier-Transformation . . . . .	275
67.	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	276
68.	Filterung von Bildsignalen . . . . .	277

<b>III Formeln und Tabellen</b>	<b>279</b>
<b>A Messtechnische Grundlagen</b>	<b>281</b>
A.1 Maßeinheiten . . . . .	281
A.2 Lösung von Differentialgleichungen . . . . .	282
A.3 Systembeschreibung im Frequenzbereich . . . . .	284
A.4 Fehlerrechnung . . . . .	284
A.4.1 Systematische Fehler . . . . .	284
A.4.2 Fehlerfortpflanzung . . . . .	285
A.4.3 Zufällige Fehler . . . . .	286
<b>B Schaltungstechnische Grundlagen</b>	<b>289</b>
<b>C Digitale Messung nichtelektrischer Größen</b>	<b>291</b>
<b>D Digitale Verarbeitung von Messsignalen</b>	<b>293</b>
D.1 Faltungsintegral . . . . .	293
D.2 Fourier-Transformation . . . . .	293
D.3 Diskrete Fourier-Transformation (DFT) . . . . .	293
<b>Literatur</b>	<b>295</b>
<b>Index</b>	<b>297</b>