

Literaturverzeichnis

- [1.1] Niebuhr, J., Lindner, G.: Physikalische Messtechnik mit Sensoren, Oldenbourg (2001)
- [1.2] Profos, P.: Handbuch der industriellen Messtechnik, Oldenbourg (2002)
- [1.3] DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik, Beuth Verlag
- [1.4] VDI/VDE 2600 : Metrologie, VDI/VDE-Handbuch Messtechnik
- [1.5] Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik, Hanser (2007)
- [1.6] Bergmann, K.: Elektrische Messtechnik, Vieweg (1993)
- [1.7] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Die SI-Basiseinheiten, PTB-Bericht (1994)
- [1.8] Kibble, B.: A Realisation of the SI Watt by the NPL Moving-coil Balance. Metrologia 27 (1990), S. 173-192
- [1.9] Josephson, B. D.: Possible New Effects in Superconductive Tunneling. Phys. Letters 1 (1962), S. 251-253
- [1.10] Fischer, B.: Eigenschaften von Atomuhren und ihre Verwendung bei der Zeitskalenherstellung, PTB-Bericht PTB-Opt-35 (1991)
- [1.11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Entwicklung und Aufgaben, PTB-Schrift (1994)
- [2.1] Sachs, L.: Angewandte Statistik, Springer (2006)
- [2.2] Bamberg, G.: Statistik, Oldenbourg (2006)
- [2.3] Kregel, U.: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik, Vieweg (2005)
- [2.4] Bartsch, H.J.: Taschenbuch mathematischer Formeln, Hanser (2004)
- [2.5] Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch (2000)
- [2.6] DIN : Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth Verlag (1995)
- [3.1] IEC 359 : Angaben zum Betriebsverhalten elektrischer und elektronischer Messeinrichtungen

- [3.2] EN 50081 : Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Störaussendung,
EN 50082 : Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Störfestigkeit,
Beuth Verlag
- [3.3] Lüke, H.D.: Signalübertragung, Springer (2007)
- [3.4] Föllinger, O.: Laplace-, Fourier- und z-Transformation, Hüthig (2003)
- [3.5] Frohne, H./Ueckert, E.: Grundlagen der elektrischen Messtechnik, Teubner (1984)
- [3.6] Profos, P./Pfeifer, T.: Grundlagen der Messtechnik, Oldenbourg (1997)
- [3.7] IEC 51-1 : Direkt wirkende anzeigende, analoge elektrische Messgeräte und ihr Zubehör
- [4.1] Dobrinski, P., Krakau, G., Vogel, A.: Physik für Ingenieure, Teubner (2006)
- [4.2] Lochmann, D.: Digitale Nachrichtentechnik, Verlag Technik (2001)
- [4.3] Datenbücher: Data Acquisition der Firmen Analog Devices, Burr-Brown Corporation, Linear Technology Corporation, Maxim Integrated Products Inc., National Semiconductor Corporation, Texas Instruments Semiconductor
- [4.4] Preuß, L., Musa, H.: Computerschnittstellen, Hanser (1993)
- [4.5] Poitrowski, A.: IEC-Bus Software, Franzis (1989)
- [4.6] Schnell, G.: Bussysteme in der Automatisierungstechnik, Vieweg (2006)
- [4.7] Jamal, R.: LabVIEW Das Grundlagenbuch, Addison-Wesley (2004)
- [5.1] Moeller, F., Frohne, H., Löcherer, K.H., Müller, H.: Grundlagen der Elektrotechnik, Teubner (2005)
- [5.2] Seifart, M.: Analoge Schaltungen, Verlag Technik (2003)
- [5.3] Tietze, U., Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer (2002)
- [5.4] Horowitz, P., Hill, W.: Die hohe Schule der Elektronik 1 und 2, Elektor-Verlag (2006)
- [5.5] DIN 40110: Wechselstromgrößen, Beuth Verlag
- [5.6] Führer, A., Heidemann, K., Nerretter, W.: Grundgebiete der Elektrotechnik Band 2, Hanser (2006)
- [5.7] DIN VDE 0414: Messwandler, Teil 1 (Stromwandler), Teil 2 (Spannungswandler), Beuth Verlag
- [6.1] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Werksschrift Hottinger Baldwin Messtechnik (1987)

- [6.2] Prock, J.: Einführung in die Prozessmesstechnik, Teubner (1997)
- [6.3] Bonfig, K.: Temperatursensoren, Expert Verlag (1995)
- [6.4] Lerch, R.: Elektrische Messtechnik, Springer (2006)
- [6.5] Meinke, H., Gundlach, F.W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer (1992)
- [6.6] Becker, W.-J., Bonfig, K.W., Höing, K.: Handbuch elektrische Messtechnik, Hüthig (2000)
- [6.7] Agilent Technologies : The Impedance Measurement Handbook, Applikationsschrift Agilent Technologies (2006)
- [6.8] Cooper, W.D., Helfrick, A.D.: Elektrische Messtechnik, VCH Verlag (1998)
- [7.1] DIN 40108 : Elektrische Energietechnik, Stromsysteme, Beuth Verlag
- [7.2] Nelles, D., Tuttas, C.: Elektrische Energietechnik, Teubner (1998)
- [7.3] Kahmann, M.: Elektrische Energie elektronisch gemessen, VDE-Verlag (2001)
- [7.4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Prüfregeln, Band 6 „Elektrizitätszähler“ (1998, 2005)
- [7.5] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Verfahren zur Stichprobenprüfung von Elektrizitätszählern mit elektronischen Messwerken und von elektronischen Zusatzeinrichtungen, PTB-Mitteilungen 102 (1992)
- [8.1] Carter, H.: Kleine Oszilloskoplehre, Hüthig (1999)
- [8.2] Benda, D., Lipinski, K.: Oszilloskope für Praktiker, VDE-Verlag (1997)
- [8.3] Tektronix: Das XYZ der Analog- und Digitaloszilloskope, Werksschrift Tektronix (2001)
- [8.4] Tektronix: ABC of Probes, Werksschrift Tektronix (2005)
- [9.1] Beuth, K.: Digitaltechnik, Vogel-Fachbuchverlag (2006)
- [9.2] Urbanski, K.: Digitaltechnik, Springer (2004)
- [9.3] Fricke, K.: Digitaltechnik, Vieweg (2005)
- [9.4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Zur Zeit, PTB-Schrift (1995)
- [9.5] Hilberg, W.: Funkuhren, Zeitsignale, Normalfrequenzen, Verlag Sprache und Technik (1995)
- [10.1] Klingen, B.: Fouriertransformation für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer (2001)

- [10.2] DIN 5493 : Logarithmische Größenverhältnisse, Beuth Verlag
- [10.3] Witte, R.A.: Spectrum and Network Measurements, Noble Publishing (2001)
- [10.4] Brand, H.: Spektrumanalyse, Werksschrift Acterna GmbH (Wandel&Goltermann) (1996)
- [10.5] Rauscher, C.: Grundlagen der Spektrumanalyse, Werksschrift Rohde&Schwarz GmbH (2004)
- [10.6] Brigham, E.O.: FFT-Anwendungen, Oldenbourg (1997)
- [10.7] Zonst, A.: Understanding FFT Applications, Citrus Press (2004)

Lösungen zu den Aufgaben

Aufgaben zur Toleranz, Messunsicherheit und Fehlerfortpflanzung

Aufgabe 2.1

$$a) \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} = \frac{2,26 \cdot 4,75 \text{ nF}}{\sqrt{10}} = 3,4 \text{ nF} \quad (\text{aus Tabelle : } 95\%, n = 10 \rightarrow t = 2,26)$$

Der Vertrauensbereich des Erwartungswertes ist $56,8 \text{ nF} \pm 3,4 \text{ nF}$.

b) Der Bereich, in dem 95% der Kapazitätswerte der Charge liegen, ist $\mu \pm 1,96 \cdot \sigma$. Dieser Bereich wird auf der Basis der Stichprobe abgeschätzt durch

$$\bar{x} \pm 1,96 \cdot s \quad \rightarrow \quad 56,8 \text{ nF} \pm 1,96 \cdot 4,75 \text{ nF} \quad \rightarrow \quad 56,8 \text{ nF} \pm 9,3 \text{ nF} .$$

$$c) \text{ Anteil } a = \int_{55,8 \text{ nF}}^{57,8 \text{ nF}} f(C) dC = \int_{55,8 \text{ nF}}^{57,8 \text{ nF}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-0,5 \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} dC$$

Für $x \approx \mu$ ist der Exponentialterm ≈ 1 (Annahme einer angenäherten Rechteckverteilung für die selektierten Kondensatoren).

$$a = \int_{55,8 \text{ nF}}^{57,8 \text{ nF}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 4,75 \text{ nF}} \cdot 1 dC = \frac{2 \text{ nF}}{\sqrt{2\pi} \cdot 4,75 \text{ nF}} = 0,17$$

17% der Kondensatoren der Fertigungscharge liegen im Bereich $56,8 \text{ nF} \pm 1,0 \text{ nF}$.

Aufgabe 2.2

$$a) R = \frac{U_1}{I} = \frac{565 \text{ mV}}{1,35 \text{ mA}} = 419 \Omega$$

$$u_{rel U} = 0,02 \quad u_{rel I} = 0,03$$

$$u_{rel R} = \sqrt{u_{rel U}^2 + u_{rel I}^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,03^2} = 0,036$$

$$u_R = 0,036 \cdot 419 \Omega = 15 \Omega$$

Das vollständige Messergebnis ist $419 \Omega \pm 15 \Omega$.

$$b) U = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

$$U = \frac{565mV + 559mV}{2} = 562 mV$$

$$u_{U_1} = 0,02 \cdot 565mV = 11,3mV \quad u_{U_2} = 10mV$$

$$\frac{\delta U}{\delta U_1} = 0,5 \quad \frac{\delta U}{\delta U_2} = 0,5$$

$$u_U = \sqrt{\left(\frac{\delta U}{\delta U_1} \cdot u_{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta U}{\delta U_2} \cdot u_{U_2}\right)^2} = \sqrt{(0,5 \cdot 11,3mV)^2 + (0,5 \cdot 10mV)^2} = 7,5mV$$

Der Mittelwert der beiden Messungen beträgt $U = 562 mV \pm 7,5 mV$.

Aufgaben zu statischen und dynamischen Eigenschaften von Messgeräten

Aufgabe 3.1

a) $u_I = 1\% \cdot 100mA = 1,0 mA$ (im gesamten Messbereich)

$$u_{rel I} = \frac{u_I}{I} = \frac{1,0 mA}{71,5mA} = 1,4 \%$$

b) $u_U = 0,5\% \cdot 543mV + 4 \cdot 1mV = 6,7 mV$

$$u_{rel U} = \frac{u_U}{U} = \frac{6,7 mV}{543mV} = 1,2 \%$$

c) $P = U \cdot I = 543mV \cdot 71,5mA = 38,8 mW$

$$u_{rel U} = 0,012 \quad u_{rel I} = 0,014$$

$$u_{rel R} = \sqrt{u_{rel U}^2 + u_{rel I}^2} = \sqrt{0,012^2 + 0,014^2} = 0,018$$

Das vollständige Messergebnis ist $38,8 mW ; \pm 1,8 \%$.

Aufgabe 3.2

a) $E = \frac{U_a}{I_e} = \frac{200mV}{2,00A} = 100 \frac{mV}{A}$

$$|\underline{G}(j\omega)| = \frac{E}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} = \frac{\hat{U}_a(\omega)}{\hat{I}_e(\omega)}$$

$$|\underline{G}(j\omega_1)| = \frac{E}{\sqrt{1 + (\omega_1 T)^2}} = \frac{10\text{mV} \cdot \sqrt{2}}{1,00\text{A}} \quad \text{für } \omega_1 = 2\pi \cdot 10\text{kHz}$$

$$\sqrt{1 + (\omega_1 T)^2} = \frac{E \cdot 1,00\text{A}}{10\text{mV} \cdot \sqrt{2}} = \frac{100\text{mV/A} \cdot 1,00\text{A}}{10\text{mV} \cdot \sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}}$$

$$T = \frac{1}{\omega_1} \cdot \sqrt{\left(\frac{10}{\sqrt{2}}\right)^2 - 1} = \frac{\sqrt{49}}{2\pi \cdot 10\text{kHz}} = 0,11\text{ ms}$$

$$\text{b) } f_g = \frac{1}{2\pi \cdot T} = \frac{1}{\sqrt{49}/10\text{kHz}} = 1429\text{ Hz}$$

$$\text{c) } u_a(t) = I_0 \cdot E \cdot \left(1 - e^{-t/T}\right) \quad u_{a\text{ soll}} = I_0 \cdot E$$

$$e_{\text{rel}}(t) = \frac{u_a(t)}{u_{a\text{ soll}}} - 1 = \left(1 - e^{-t/T}\right) - 1 = -e^{-t/T}$$

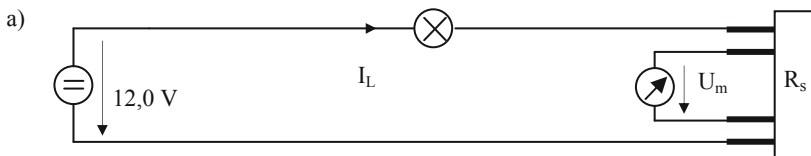
$$|e_{\text{rel}}(t)| = e^{-t/T} < 0,05 \quad \rightarrow \quad -t < T \cdot \ln(0,05)$$

$$t > -T \cdot \ln(0,05) = -0,11\text{ms} \cdot \ln(0,05) = 0,33\text{ ms}$$

Nach dem Sprung des Eingangstroms muss 0,33 ms bis zum Einschwingen auf $\pm 5\%$ gewartet werden.

Aufgaben zu Strom- und Spannungsmessung

Aufgabe 5.1



$$\text{b) } R_s = \frac{U_{m\text{ max}}}{I_{\text{max}}} = \frac{500\text{mV}}{10\text{A}} = 50\text{ m}\Omega$$

$$c) \quad I_{\text{wahr}} = \frac{12,0V}{R_L} \qquad I_m = \frac{U_m}{R_s} = \frac{425 \text{ mV}}{50 \text{ m}\Omega} = 8,50 \text{ A}$$

$$I_m = \frac{12,0V}{R_L + R_s} \rightarrow R_L = \frac{12,0V}{I_m} - R_s = \frac{12,0V}{8,5A} - 50\text{m}\Omega = 1,362 \Omega$$

$$I_{\text{wahr}} = \frac{12,0V}{R_L} = \frac{12,0V}{1,362\Omega} = 8,81A$$

Der gemessene Strom mit Shunt beträgt 8,50 A, der korrigierte Lampenstrom (ohne Shunt) 8,81 A .

Aufgabe 5.2

$$a) \quad I_{DC} = \bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = 0,8A \cdot 0,05T + 0 = 40 \text{ mA}$$

$$I_{AC \text{ rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i(t) - \bar{I})^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left((0,76A)^2 \cdot 0,05T + (-0,04A)^2 \cdot 0,95T \right)} = 174,4 \text{ mA}$$

$$b) \quad I_{\text{eff}} = \sqrt{\bar{I}^2 + I_{AC \text{ rms}}^2} = \sqrt{(40\text{mA})^2 + (174,4\text{mA})^2} = 178,9 \text{ mA}$$

$$c) \quad I_{\text{anz}} = 1,111 \cdot \overline{|i_{AC}(t)|} = 1,111 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T |i(t) - \bar{I}| dt$$

$$I_{\text{anz}} = 1,111 \cdot \frac{1}{T} \cdot (0,76A \cdot 0,05T + 0,04A \cdot 0,95T) = 1,111 \cdot 0,076A = 84,4 \text{ mA}$$

$$e_{\text{rel}}(t) = \frac{I_{\text{anz}}}{I_{AC \text{ rms}}} - 1 = \frac{84,4\text{mA}}{174,4\text{mA}} - 1 = -52\%$$

Die relative Messabweichung durch das nur für sinusförmige Signale anwendbare indirekte Messverfahren beträgt für das gegebene Rechtecksignal - 52 % .

$$d) \quad C = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{Full Scale}}} \qquad I_{AC \text{ max}} = 0,76A \quad \rightarrow \quad C = \frac{0,76A}{0,2A} = 3,8$$

Ein Crest-Faktor von 3,8 ist im 0,2 A-Messbereich notwendig, um den Effektivwert des Wechselanteils des Signals im Bereich AC_{RMS} ohne systematische Abweichung zu messen.

Aufgaben zur Widerstands- und Impedanzmessung

Aufgabe 6.1

$$a) R = \frac{U_m}{I_0} = \frac{I_0 \cdot (R_k + R_x)}{I_0} = R_k + R_x$$

$$|e_{rel}| = \left| \frac{e}{R_x} \right| = \frac{R - R_x}{R_x} = \frac{R_k}{R_x} < 2\% \rightarrow R_x > \frac{R_k}{0,02} = \frac{0,2 \Omega}{0,02} = 10 \Omega$$

Widerstände mit $R_x > 10 \Omega$ können mit einer rel. Messabweichung $< 2\%$ gemessen werden.

$$b) R_{korr} = R - e = R - R_k = \frac{U_m}{I_0} - R_k$$

$$R_{korr} = \frac{18,2 \text{ mV}}{10,0 \text{ mA}} - 0,21 \Omega = 1,61 \Omega$$

Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\sigma(U_m) = \frac{0,4 \text{ mV}}{1,96} = 0,20 \text{ mV} \quad \sigma(I_0) = 0,1 \text{ mA} \quad \sigma(R_k) = 0,05 \Omega$$

$$\frac{\delta R_{korr}}{\delta U_m} = \frac{1}{I_0} \quad \frac{\delta R_{korr}}{\delta I_0} = -\frac{U_m}{I_0^2} \quad \frac{\delta R_{korr}}{\delta R_k} = -1$$

$$\begin{aligned} \sigma(R_{korr})^2 &= \left(\frac{\delta R_{korr}}{\delta U_m} \cdot \sigma(U_m) \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{korr}}{\delta I_0} \cdot \sigma(I_0) \right)^2 + \left(\frac{\delta R_{korr}}{\delta R_k} \cdot \sigma(R_k) \right)^2 \\ &= \left(\frac{1}{10 \text{ mA}} \cdot 0,2 \text{ mV} \right)^2 + \left(-\frac{18,2 \text{ mV}}{(10 \text{ mA})^2} \cdot 0,1 \text{ mA} \right)^2 + (-1 \cdot 0,05 \Omega)^2 \end{aligned}$$

$$\sigma(R_{korr})^2 = 3,23 \cdot 10^{-3} \Omega^2$$

$$\sigma(R_{korr}) = 0,057 \Omega \quad 1,96 \cdot \sigma(R_{korr}) = 0,11 \Omega$$

Das vollständige Messergebnis ist: $R_{korr} = 1,61 \Omega \pm 0,11 \Omega$

Aufgabe 6.2

$$a) U_a = U_0 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Nullstelle der Ausgangsspannung

$$U_a = 0 \quad \text{für} \quad R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4$$

$$U_a(\varepsilon = 0) = 0 \quad \rightarrow \quad R_1(\varepsilon = 0) = R_2(\varepsilon = 0) \quad \rightarrow \quad R_3 = R_4$$

Ersatzspannungsquelle für die Messbrücke

$$U_q = U_a \quad R_q = R_1 // R_2 + R_3 // R_4 = \frac{350 \, \Omega}{2} + \frac{R_3}{2}$$

Belastete Messbrücke

$$U_L = U_q \cdot \frac{R_L}{R_q + R_L}$$

$$e_{rel} = \frac{U_L}{U_q} - 1 = \frac{R_L}{R_q + R_L} - 1 = -\frac{R_q}{R_q + R_L} \quad |e_{rel}| = \frac{R_q}{R_q + R_L} < 0,5\%$$

$$R_q < 0,005 \cdot R_q + 0,005 \cdot R_L$$

$$R_q < \frac{0,005 \cdot R_L}{0,995} = 502,5 \, \Omega \quad \rightarrow \quad R_q = 175 \, \Omega + \frac{R_3}{2} < 502,5 \, \Omega$$

$$R_3 < 655 \, \Omega$$

Wahl : $R_3 = R_4 = 560 \, \Omega$ (nicht zu niederohmig, damit der Strom durch die Dehnungsmessstreifen bzw. die Belastung der Brückenspeisespannung nicht zu groß wird)

$$\begin{aligned} \text{b) } U_a &= U_0 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = U_0 \cdot \frac{560 \, \Omega \cdot 350 \, \Omega \cdot (1 - 2\varepsilon) - 560 \, \Omega \cdot 350 \, \Omega \cdot (1 + 2\varepsilon)}{700 \, \Omega \cdot 1120 \, \Omega} \\ &= U_0 \cdot \frac{560 \, \Omega \cdot 350 \, \Omega}{700 \, \Omega \cdot 1120 \, \Omega} (1 - 2\varepsilon - (1 + 2\varepsilon)) = U_0 \cdot \frac{1}{2 \cdot 2} (-4\varepsilon) = -U_0 \cdot \varepsilon \end{aligned}$$

$$E = \frac{\delta U_a}{\delta \varepsilon} = -U_0 = -5 \, V = -5 \frac{mV}{10^{-3}}$$

Die Empfindlichkeit ist konstant (linearer Zusammenhang). Bei einer Dehnung von 10^{-3} beträgt die Ausgangsspannung der Messbrücke $-5 \, mV$.

Aufgabe 6.3

a) Stromrichtige Schaltung

$$R = \frac{U}{I} = \frac{34,6 \, mV}{5,25 \, mA} = 6,59 \, \Omega = R_I + R_x$$

$$R_x = R - R_I = 6,59 \, \Omega - 2,5 \, \Omega = 4,09 \, \Omega$$

Der Gleichstrom-Spulenwiderstand beträgt $4,09 \Omega$.

$$b) \quad \tan \delta = \frac{1}{Q} = \frac{R_s}{\omega L_s}$$

$$R_s = \omega L_s \cdot \tan \delta = 2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 145 \text{ mH} \cdot 0,061 = 55,6 \Omega$$

Der Serien-Ersatzwiderstand beträgt $55,6 \Omega$.

- c) R_s ist der äquivalente Verlustwiderstand im Serien-Ersatzschaltbild der Spule. Er repräsentiert alle Verlustmechanismen in der Spule bei 1 kHz: ohmsche Verluste, Wirbelstromverluste, Magnetisierungsverluste und andere. Der bei DC gemessene Widerstandswert R_x ist nur der ohmsche Widerstand, da es bei Gleichstrom keine Wirbelstromverluste oder Magnetisierungsverluste gibt. Deshalb ist $R_x < R_s$.

$$d) \quad |Z| = \sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2} = \sqrt{(55,6 \Omega)^2 + (2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 145 \text{ mH})^2} = 913 \Omega$$

$$\varphi = 90^\circ - \delta = 90^\circ - \arctan(\tan \delta) = 90^\circ - \arctan(0,061) = 90^\circ - 3,49^\circ = 86,51^\circ$$

- e) Serienschaltung der Spule mit dem Kondensator

$$\underline{Z}_{ges} = R_s + j\omega L_s + R_C + \frac{1}{j\omega C} \quad Q_C = \frac{1/\omega C}{R_C} = \frac{1}{R_C \cdot \omega C}$$

$$\underline{Z}_{ges} = R_s + \frac{1}{Q_C \cdot \omega C} + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$\underline{Z}_{ges} = 55,6 \Omega + \frac{1}{50 \cdot 2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 100 \text{ nF}} + j\left(2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 145 \text{ nH} - \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 100 \text{ nF}}\right)$$

$$\underline{Z}_{ges} = 87,4 \Omega - j680 \Omega$$

Anzeigewerte

$$Q_{anz} = \frac{|X_{ges}|}{R_{ges}} = \frac{680 \Omega}{87,4 \Omega} = 7,8$$

$$X_{ges} = \omega L_{anz} \rightarrow L_{anz} = \frac{X_{ges}}{\omega} = \frac{-680 \Omega}{2\pi \cdot 1000 \text{ Hz}} = -108 \text{ mH}$$

$$X_{ges} = -\frac{1}{\omega C_{anz}} \rightarrow C_{anz} = -\frac{1}{\omega \cdot X_{ges}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 680 \Omega} = 234 \text{ nF}$$

Aufgaben zur Leistungsmessung

Aufgabe 7.1

$$\text{a) } Q = \frac{P_{anz}}{\sqrt{3}} = \frac{220 \text{ var}}{\sqrt{3}} = 127,0 \text{ var} \quad Q_{ges} = 3 \cdot Q = 381,0 \text{ var}$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = \sqrt{(U_{iN} \cdot I)^2 - Q^2} = \sqrt{\left(\frac{390V}{\sqrt{3}} \cdot 1,5A\right)^2 - (127 \text{ var})^2} = 313 \text{ W}$$

$$P_{ges} = 3 \cdot P = 939 \text{ W}$$

$$|Z_{stern}| = \frac{U_{iN}}{I} = \frac{390V/\sqrt{3}}{1,5A} = 150 \Omega \quad |Z_{\Delta}| = 3 \cdot |Z_{stern}| = 450 \Omega$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) = \arctan\left(\frac{127 \text{ var}}{313W}\right) = 22,1^\circ$$

Damit ist $Q_{ges} = 381 \text{ var}$, $P_{ges} = 939 \text{ W}$ und $Z = 450 \Omega \cdot e^{+j22,1^\circ}$.

$$\text{b) } Q_C = \frac{U_{iN}^2}{-1/\omega C} = -U_{iN}^2 \cdot \omega C = -\left(\frac{390V}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 314 \frac{1}{s} \cdot 10 \mu F = -159,2 \text{ var}$$

$$Q_{neu} = Q + Q_C = 127,0 \text{ var} - 159,2 \text{ var} = -32,2 \text{ var} \quad P_{anz} = \sqrt{3} \cdot Q_{neu} = -55,8 \text{ W}$$

Mit den Kondensatoren ist der Anzeigewert des elektrodynamischen Messgerätes $-55,8 \text{ W}$.

Aufgabe 7.2

$$\text{a) } P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 228V \cdot 0,56A \cdot \cos 20^\circ = 120,0 \text{ W}$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 228V \cdot 0,56A \cdot \sin 20^\circ = 43,7 \text{ var}$$

$$S = U \cdot I = 228V \cdot 0,56A = 127,7 \text{ VA}$$

$$\text{b) } \sum Q = Q + Q_k = 0 \rightarrow Q_k = -Q = -43,7 \text{ var} \rightarrow \text{Kondensator}$$

$$Q_C = \frac{U_{iN}^2}{-1/\omega C} = -U_{iN}^2 \cdot \omega C = -43,7 \text{ var}$$

$$C = \frac{43,7 \text{ var}}{(228V)^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 2,68 \mu F$$

Zur vollständigen Blindleistungskompensation wird ein Kondensator mit $C = 2,68\mu\text{F}$ parallel zu \underline{Z} geschaltet.

$$c) P = P_{alt} = 120,0 \text{ W} \quad Q = 0 \quad S = P = 120 \text{ VA}$$

$$I_{neu} = \frac{P}{U} = \frac{120 \text{ W}}{228 \text{ V}} = 0,526 \text{ A}$$

Aufgabe 7.3

a) Stromzange um L2 (I_2), Spannungsklemmen an L2 und N (U_{2N}).

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= \underline{U}_{2N} \cdot \underline{I}_2^* = \underline{U}_{2N} \cdot \left(\frac{\underline{U}_{2N}}{\underline{Z}_2} \right)^* = \frac{|\underline{U}_{2N}|^2}{|\underline{Z}_2|^2} \cdot \underline{Z}_2 = \frac{(395 \text{ V} / \sqrt{3})^2}{(150 \Omega)^2} \cdot 150 \Omega \cdot e^{-j20^\circ} \\ &= 346,7 \text{ VA} \cdot e^{-j20^\circ} = 325,8 \text{ W} - j 118,6 \text{ var} \end{aligned}$$

$$P = 325,8 \text{ W} \quad Q = -j 118,6 \text{ var} \quad \cos \varphi = \cos(-20^\circ) = 0,94$$

b) Stromzange um L3 (I_3), Spannungsklemmen an L3 und N (U_{3N}).

$$|\underline{Z}_3| = \frac{U_{3N}}{I_3} = \frac{U_{3N}}{S_3 / U_{3N}} = \frac{U_{3N}^2}{S_3} = \frac{U_{3N}^2}{\sqrt{P_3^2 + Q_3^2}} = \frac{(395 \text{ V} / \sqrt{3})^2}{\sqrt{(350 \text{ W})^2 + (290 \text{ var})^2}} = 114,4 \Omega$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) = \arctan\left(\frac{290 \text{ var}}{350 \text{ W}}\right) = 39,6^\circ$$

Damit ist $\underline{Z} = 114,4 \Omega \cdot e^{+j39,6^\circ}$ und $\cos \varphi = \cos(39,6^\circ) = 0,77$.

c) $Q > 0 \rightarrow$ Kondensator zwischen L3 und N.

$$\tan \varphi_{neu} = \frac{Q_{neu}}{P}$$

$$Q_{neu} = P \cdot \tan \varphi_{neu} = P \cdot \tan(\arccos(\cos \varphi_{neu})) = 350 \text{ W} \cdot \tan(\arccos(0,95)) = 115,0 \text{ var}$$

$$\Delta Q = Q_{neu} - Q = 115 \text{ var} - 290 \text{ var} = -175 \text{ var} < 0 \rightarrow \text{Kondensator}$$

$$Q_C = \frac{U_{3N}^2}{-1/\omega C} = -U_{3N}^2 \cdot \omega C \rightarrow C = \frac{-175 \text{ var}}{(395 \text{ V} / \sqrt{3})^2 \cdot 314 \text{ Hz}} = 10,7 \mu\text{F}$$

Zur Blindleistungskompensation für $\cos \varphi = 0,95$ wird ein Kondensator mit $C = 10,7 \mu\text{F}$ parallel zu \underline{Z}_3 geschaltet.

$$d) \frac{I_{neu}}{I_{alt}} = \frac{S_{neu}}{S_{alt}} = \frac{P / \cos \varphi_{neu}}{P / \cos \varphi_{alt}} = \frac{\cos \varphi_{alt}}{\cos \varphi_{neu}} = \frac{0,77}{0,95} = 0,81$$

Der Strom wird durch die Blindleistungskompensation um 19% reduziert.

Aufgaben zur Zeit- und Frequenzmessung

Aufgabe 9.1

$$a) \text{ Frequenzauflösung } df = \frac{1}{T_0}, \quad \text{relative Frequenzauflösung } \frac{df}{f} = \frac{1}{T_0 \cdot f} < 10^{-3}$$

$$f > \frac{10^3}{T_0} = \frac{10^3}{1s} = 1 \text{ kHz}$$

Der Bereich 1 kHz bis 10 MHz ist mit einer rel. Auflösung von besser als 10^{-3} mit der direkten Frequenzzählung messbar.

Ungünstigste Frequenz in diesem Bereich: $f = 1 \text{ kHz}$ (da schlechteste relative Auflösung)

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| = \frac{1}{T_0 \cdot f} + \left| \frac{\Delta f_R}{f_R} \right| = \frac{1}{1s \cdot 1kHz} + \left| 0,5 \cdot 10^{-4} \right| = 1,05 \cdot 10^{-3}$$

$$b) \text{ Zeitauflösung der Periodendauermessung } dT = \frac{1}{f_R}$$

$$\text{Umkehrverfahren: } f = \frac{1}{T}, \quad \text{relative Frequenzauflösung } \frac{df}{f} = \frac{dT}{T} = \frac{1}{T \cdot f_R}$$

$$\frac{df}{f} = \frac{1}{T \cdot f_R} = \frac{f}{f_R} < 10^{-3} \quad \rightarrow \quad f < 10^{-3} \cdot f_R = 10^{-3} \cdot 10MHz = 10 \text{ kHz}$$

Der Bereich 1 Hz bis 10 kHz ist mit einer rel. Auflösung von besser als 10^{-3} mit dem Umkehrverfahren messbar.

$$c) \text{ relative Frequenzauflösung } df = \frac{1}{T_0 \cdot f_R} = \frac{1}{1s \cdot 10MHz} = 10^{-7}$$

Alle Frequenzen im Bereich 1 Hz bis 10 MHz lassen sich mit einer rel. Auflösung von 10^{-7} mit dem Verhältniszählverfahren messen.

Aufgaben zur Spektralanalyse

Aufgabe 10.1

a) Eingangssignal $f_1 = 1 \text{ MHz}$, $U_e = \frac{2mV}{\sqrt{2}}$, $P_e = \frac{U_e^2}{R_e} = \frac{(2mV/\sqrt{2})^2}{50\Omega} = 40 \text{ nW}$

$$L_e = 10 \cdot \log\left(\frac{40nW}{1mW}\right) \text{ dBm} = -44 \text{ dBm}$$

Ausgangssignal $f_1 = 1 \text{ MHz}$, aus Diagramm $\Delta L = +5 \text{ dB}$

$$L_1 = L_{\text{Ref}} + \Delta L = -30 \text{ dBm} + 5 \text{ dB} = -25 \text{ dBm}$$

Verstärkung $v = L_1 - L_e = -25 \text{ dBm} - (-44 \text{ dBm}) = 19 \text{ dB}$

b) $f_1 = 1 \text{ MHz}$ $L_1 = -25 \text{ dBm}$, $P_1 = 10^{\frac{-25 \text{ dBm}}{10 \text{ dBm}}} \text{ mW} = 3,16 \mu \text{W}$

$$U_1 = \sqrt{P_1 \cdot R_e} = 12,6 \text{ mV}$$

$f_2 = 3 \text{ MHz}$ $L_2 - L_1 = -10 \text{ dB} \rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{-10 \text{ dB}}{20 \text{ dB}}} = 0,316$,

$$U_2 = 0,316 \cdot U_1 = 4,0 \text{ mV}$$

$f_3 = 5 \text{ MHz}$ $L_3 - L_1 = -17,5 \text{ dB} \rightarrow \frac{U_3}{U_1} = 10^{\frac{-17,5 \text{ dB}}{20 \text{ dB}}} = 0,133$,

$$U_3 = 0,133 \cdot U_1 = 1,7 \text{ mV}$$

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}} = \frac{\sqrt{4,0^2 + 1,7^2}}{\sqrt{12,6^2 + 4,0^2 + 1,7^2}} = 32 \%$$

Der Klirrfaktor des Ausgangssignals beträgt 32 %.

Aufgabe 10.2

a) $f_2 = 140 \text{ kHz}$ Signal bei 140 kHz, keine Dämpfung, Anzeige $L_2 = 10 \text{ dBm}$,

$f_1 = 130 \text{ kHz}$ kein Signal bei 130 kHz, aber Signal bei 140 kHz,

$\Delta f = 10\text{kHz} = RBW$, Dämpfung des 140kHz-Signals: 13 dB

Anzeige $L_1 = L_2 - 13\text{dB} = -3\text{ dBm}$,

$f_3 = 150\text{ kHz}$ Signal bei 150 kHz, keine Dämpfung, $L_{3a} = -15\text{ dBm}$,

Signal bei 140 kHz, $\Delta f = 10\text{kHz} = RBW$, Dämpfung des 140kHz-

Signals: 13 dB, $L_{3b} = L_2 - 13\text{dB} = -3\text{ dBm}$,

Anzeige: größerer Wert von L_{3a} und L_{3b} : $L_3 = -3\text{ dBm}$

$f_4 = 160\text{ kHz}$ kein Signal bei 160 kHz, aber

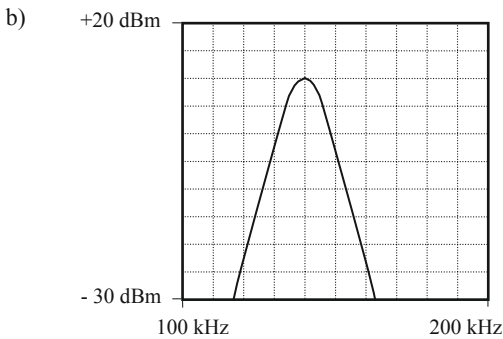
Signal bei 150 kHz, $\Delta f = 10\text{kHz} = RBW$, Dämpfung des 150kHz-

Signals: 13 dB, $L_{4a} = L_{3a} - 13\text{dB} = -28\text{ dBm}$,

Signal bei 140 kHz, $\Delta f = 20\text{kHz} = 2 \cdot RBW$, Dämpfung des 140kHz-

Signals: 34 dB, $L_{4b} = L_2 - 34\text{dB} = -24\text{ dBm}$,

Anzeige: größerer Wert von L_{4a} und L_{4b} : $L_4 = -24\text{ dBm}$



Der kleine Signalanteil bei 150 kHz, der bei einer kleinen RBW dargestellt und auswertbar ist (siehe Bild Aufgabenstellung), wird bei einer $RBW = 10\text{ kHz}$ vom großen Signalanteil bei 140 kHz überdeckt und ist nicht mehr erkennbar.

Sachwortverzeichnis

A

Aaron-Schaltung 177, 180
Abgleichbedingung 132, 154
Abgleich-Widerstandsmessbrücke
131
Abtastrate 85
Abtasttheorem 86
Abtastung 85
Aliasing 86
Ampere 24
Amplitudengang 55, 279
Amplitudenspektrum 265
Analog-Digital-Umsetzer 87
Anzeigebereich 52
Äquivalenzzeitabtastung 209
Arbeit *Siehe* Energie
Auflösebandbreite 269, 273, 275
Auflösung 53
Ausschlag-Widerstandsmessbrücke
135
Außenleiter 168
Außenleiterspannung 168
Auto-Trigger-Modus 205

B

Bandbreite 159, 268
Bandpass 268
Bandpass-Mittenfrequenz 268
Begrenzerschaltungen 99
Bemessungsbedingungen 50
bistabile Kippstufe *Siehe* Flip-Flop
Blindleistung 167
Blindleistungsmessung 174, 178, 183
Blindwiderstand 143
Brückenschaltung *Siehe* Messbrücke

C

Cäsium-Atomuhr 26
Crest-Faktor 103, 113

D

Dämpfungsgrad 62
DCF 77 26, 246
Dehnungsmessstreifen 124, 135, 141,
164
Delon-Schaltung 108
Deutscher Kalibrierdienst 28
Dezibel 266
D-Flip-Flop 238
DFT 280
Digitalmultimeter 122
Digitaloszilloskop 208
Average-Modus 214
Bilddarstellung 211
Datenaufnahme 214
Datenspeicherung 214
Interpolation 211
Peak-Detect-Modus 214
Signalabtastung 209
Triggerung 210, 215
Digitalvoltmeter 88, 97
Dioden 99
Diskrete Fourier-Transformation 280
DKD 28
Dreheisenmesswerk 78, 111
Drehmagnetmesswerk 83
Drehpulsmesswerk 74, 111
Drehstromsystem 167
Dreileitersystem 169
künstlicher Sternpunkt 170
Leistung im 170

Vierleitersystem 169
 Drehstromzähler 192
 Dreileitersystem 169
 Messungen im 177, 184
 Dreiphasensystem *Siehe*
 Drehstromsystem
 rechtsdrehend 168
 Dualzahl 231
 dynamisches Verhalten 53, 56

E

Echtzeitabtastung 209
 Effektivwert 103, 262
 Effektivwertmessung 80, 109
 digitale Berechnung 109
 elektronische 110
 indirekte 110
 mit thermischen Umformern 112
 Eichen 17
 Einheiten 19
 Einheitensystem 19
 historische Entwicklung 19
 SI-Einheiten 20
 Einschwingzeit 54
 Elektrizitätszähler
 analogrechnerischer 195
 digitaler 194
 Induktionszähler 191
 mit Hallelement 195
 Elektrizitätszählung 191
 elektrodynamischer Leistungsmesser
 171
 Blindleistungsmessung 174
 Eigenverbrauch 172
 Korrekturspule 172
 Messbereichswahl 176
 Wirkleistungsmessung 173
 elektrodynamisches Messwerk 80,
 171
 Elektronenstrahloszilloskop 198
 Alternierender Modus 205

Chopmodus 206
 Horizontalteil 203
 Sampling-Oszilloskop 207
 Speicheroszilloskop 206
 Triggerung 203
 Vertikalteil 202
 x/y-Modus 206, 218
 Zeitbasisgenerator 203
 Elektronenstrahlröhre 199
 Leuchtschirm 201
 Strahlablenkung 199
 Strahlerzeugung 199
 elektrostatisches Messwerk 83
 Empfindlichkeit 51, 58, 62
 einer Messbrücke 135
 empirische Varianz 40
 Energie 191
 Energiemessung *Siehe*
 Elektrizitätszählung
 Erwartungswert 37, 40, 43

F

Fast-Fourier-Transformation 268, 282
 Cosinus-Fenster 285
 Fensterfunktion 282, 285
 Flattop-Fenster 286
 Hamming-Fenster 285
 Hanning-Fenster 285
 Leckeffekt 284
 Rechteck-Fenster 283, 285
 Fehler 31, 70, *Siehe* Messabweichung
 Fehlerfortpflanzung
 statistische Kombination 44
 Worst-Case-Kombination 43
 Fehlergrenze 70, 72
 Fensterfunktion 282, 285
 Ferraris-Zähler 191
 FFT 268, 282
 FFT-Analysator 280, 287
 Flattop-Fenster 286
 Flip-Flop 234

asynchrones RS-Flip-Flop 235
 D-Flip-Flop 238
 JK-Flip-Flop 237
 taktgesteuertes RS-Flip-Flop 236
 T-Flip-Flop 239
 Formfaktor 103, 111
 Fortpflanzung
 systematischer Messabweichungen
 33
 von Messunsicherheiten 47
 zufälliger Messabweichungen 42
 Fourier-Koeffizient 261
 Fourier-Reihe 260
 Fourier-Transformation 55, 264, 280
 Fourier-Transformierte 264
 Frequenzgang 55, 279
 Frequenzmessung 249
 analoge 257
 digitale 249
 direkte Zählung 249
 mit Oszilloskop 217
 Torzeit 249
 Umkehrverfahren 252
 Verhältniszählverfahren 253
 Frequenzmischung 271
 Frequenz-Sweep 273

G

Gatter 234, *Siehe* Verknüpfung
 Gaußsche Fehlerfortpflanzung 44
 Gaußverteilung 38
 Genauigkeit 53, 69
 Genauigkeitsklasse 72, 84, 119
 Gleichanteil 103
 Gleichrichter
 Einweggleichrichtung 105
 Spitzenwert- 107
 Vollweggleichrichtung 105
 Gleichrichtwert 103
 Gleichverteilung 39
 Grenzfrequenz 60

Grundgesamtheit 37, 40
 Grundschiwingung 262
 Grundschiwingungsgehalt 262
 Güte 143, 147, 149, 160, 161

H

Halbbrücke 138, 157
 Halbleiterdioden 99
 Halleffekt 188
 Hallelement 188, 195, 228
 Hamming-Fenster 285
 Hanning-Fenster 285
 Hummelschaltung 175

I

Impedanzmessung 142, 164
 2-Leiter-Anschluss 151
 3-Spannungsmessung 146
 4-Leiter-Anschluss 151
 Abgleich 152
 I-U-Verfahren 147
 Messbrücken 153
 Messung der Gleich- und
 Effektivwerte 146
 Probenkontaktierung 150
 Resonanzverfahren 158
 Induktionszähler 191
 Induktivitätsmessung *Siehe*
 Impedanzmessung
 inverse Fourier-Transformation 264
 I-U-Verfahren 147

J

JK-Flip-Flop 237
 Justieren 17

K

Kalibrieren 16

Kalibrierkette 28
 Kapazitätsmessung *Siehe*
 Impedanzmessung
 Kenngrößen 50
 Kennlinie 51
 Kennlinien
 Darstellung von 218
 Kettenstruktur 66
 Klassenindex 72
 Klirrfaktor 263
 Kompensationsmethode 18
 Konstantstromquelle 129
 Kontaktwiderstand 130, 131, 133, 150
 Korrektur 33
 Kreuzpulmesswerk 83
 künstlicher Sternpunkt 170

L

Laplace-Transformation 54
 LCR-Messgerät 148, 149
 Leerlauf-Kurzschluss-Abgleich 152
 Leistung 165
 Leistungsfaktor 167
 Bestimmung des 175
 Leistungsmesser
 analogmultiplizierender 186
 digitaler 181
 elektrodynamisches Messwerk
 171
 mit Hallelement 189
 mit Time-Division-Multiplikation
 187
 Leistungsmessung
 im Drehstromsystem 176, 183
 im Gleichstromkreis 171
 im Wechselstromkreis 173, 182
 Leitungswiderstand 130, 131, 150
 Leuchtschirm 201

M

Maßeinheit *Siehe* SI-Einheiten
 Messabweichung 15, 30, 47
 Betriebsmessabweichung 70
 dynamische 53
 Eigenabweichung 70
 Grenzwerte 70
 relative 30
 systematische 32
 zufällige 35
 Messabweichungen
 Reduzierung dynamischer 67
 Messbereich 52
 Messbereichsbegrenzung 99
 Messbereichsendwert 90
 Messbrücke 131
 Abgleich-Widerstands- 131
 Ausschlag-Widerstands- 135
 belastete 140
 Dimensionierung 141
 Halbbrücke 138
 LC- 153
 Maxwell-Wien-Brücke 155
 Schering-Brücke 155, 156
 spannungsgespeist 135
 stromgespeist 139
 Thomson- 133
 Viertelbrücke 137
 Vollbrücke 138
 Wechselspannungs- 153
 Wechselspannungs-Ausschlag-
 156
 Wheatstone- 132
 Messeinrichtung 15
 Messen 12
 Messergebnis 15
 vollständiges Messergebnis 47
 Messfehler 31
 Messgerät 15
 Messgleichrichter *Siehe* Gleichrichter
 Messgröße 14
 richtige Wert 15

wahre Wert 15
 Messgrößenaufnehmer 15
 Messmethoden 17
 Ausschlagmethode 18
 Kompensationsmethode 18
 Messsystem 1. Ordnung 58
 Messsystem 2. Ordnung 62
 Messumformer 89
 Messunsicherheit 15, 46
 Angabe der 47
 Fortpflanzung der 47
 relative 46
 Messwandler 114
 Eigenschaften 118
 Spannungswandler 117
 Stromwandler 117
 Stromzange 117
 Übersetzungsverhältnis 116
 Messwerk
 Dreheisenmesswerk 78
 Drehmagnetmesswerk 83
 Drehspulmesswerk 74
 elektrodynamisches Messwerk 80
 elektrostatisches Messwerk 83
 Kreuzspulmesswerk 83
 Symbole 83
 Messwert 15
 korrigierter Messwert 33
 Mischer 271
 Mittelwert 40, 103, 107
 Mittelwertbildung 107
 Mono-Flop 239
 monostabile Kippstufe 239
 Multimeter 120
 Multiplizierer 81, 186, 187, 188

N

Naturkonstanten 23
 Nenngebrauchsbereich 50
 Netzwerkanalysator 279
 Normale 27

Normalfrequenzsender 26, 246
 Normalverteilung 38
 Normen 13

O

Oberschwingung 262
 Ohm 25
 ohmsche Widerstandsmessung *Siehe*
 Widerstandsmessung
 Oszilloskop
 Digital- 208
 Elektronenstrahl- 198
 Erdung 215, 227
 Messanwendungen 215
 Tastkopf 219

P

Parallelersatzschaltung 144
 Pegel 265
 dB, dBm 266
 Leistungs- 265
 Pegeldifferenz 266
 Spannungs- 266
 Periodendauermessung 217, 245
 Phasendifferenzmessung 148, 217
 Phasengang 56, 279
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt
 (PTB) 27
 Posttriggerung 210
 Pretriggerung 210
 Prüfen 16
 PT1-Glied 58
 PT2-Glied 62, 77

Q

Quantisierung 86
 Quantisierungsabweichung 87

R

RC-Tiefpass 61
 Referenzbedingungen 50
 Reihenersatzschaltung 144
 Resolution Bandwidth 269
 Resonanzfrequenz 159
 RLC-Tiefpass 65
 RMS 109, 120
 RS-Flip-Flop 235
 Rückführbarkeit 28
 Rückwirkung 31

S

Scheinleistung 166
 Bestimmung der 175
 komplexe 167
 Scheinwiderstand 143
 Scheitelfaktor 103
 Scheitelwert 103
 Schmitt-Trigger 218
 Schwingkreis 159
 Schwingkreisgüte 161
 Schwingungsgehalt 262
 Sensor 15
 Shunt 93
 SI-Einheiten 20
 abgeleitete Einheiten 21
 Basiseinheiten 20
 experimentelle Darstellung 23
 Genauigkeit 26
 Spannungsmessung 91
 Messabweichung 92
 Messbereichserweiterung 96, 97
 mit Oszilloskop 216
 Multimeter 120
 Spannungsbegrenzung 99
 Spannungswandler 117
 Spektrum 265
 Spektrumanalysator
 FFT-Analysator 280
 Spektrumanalyse 260

abstimmbares Bandpassfilter 270
 Auflösesebandbreite 269, 273, 275
 Bandpassempfänger 268
 Eigenrauschen 277
 FFT-Analysatoren 287
 Filterbank 269
 Frequenzmischung 271
 Mitlaufsender 279
 RBW 269, 273
 Sweep Time 276
 Überlagerungsempfänger 270
 Wobbelbetrieb 273
 Spitzenwert 103
 Spitzenwertmessung 107
 Spitze-Spitze-Wert-Messung 108
 Sprungantwort 56
 Standardabweichung 37
 statisches Verhalten 51
 Sternpunktleiter 168
 Sternspannung 168
 Stichprobe 40
 Stichprobenumfang 40, 41
 Stoßantwort 56
 Streuung 37
 Stromföhlwiderstand 93
 Strommessung 90
 Messabweichung 91
 Messbereichserweiterung 94, 95
 mit einem Shunt 93
 Multimeter 120
 Stromzange 117
 Stromwandler 117, 182
 Stromzange 117, 182, 227
 symmetrische Last 169

T

Tastkopf 219, 221
 Abgleich 223
 Differenz- 227
 FET- 226
 frequenzkompensierter 222

Hallelement- 228
 passiver Spannungs- 221
 Strom- 227
 Teilverhältnis 221
 T-Flip-Flop 239
 Thomson-Brücke 133
 Time-Division-Multiplikation 187,
 195
 Torzeit 249
 Triggerschwelle 204, 210
 Triggerung 203, 208, 210, 215
 Posttriggerung 210
 Pretriggerung 210
 Triggermodus 205
 Triggerquelle 204
 Triggerschwelle 204, 210

U

Überlagerungsempfänger 270
 Überlastschutz 98
 Überschreitungswahrscheinlichkeit 41
 Übersetzungsverhältnis 116
 Übertrager 114
 Übertragungsfunktion 55
 Strukturen 66
 Universalzähler 255

V

Varianz 37, 40
 empirische 40
 Verhältniszahlverfahren 253
 Verknüpfung 232
 Exklusiv-Oder- 233
 Nand- 233
 Nicht- 232
 Nor- 233
 Oder- 232
 Und- 232
 Verlustfaktor 143
 Verlustwinkel 143

Verteilungsdichtefunktion 36
 Gleichverteilung 39
 Normalverteilung 38
 Verteilungsfunktion 35
 Vertrauensbereich des
 Erwartungswertes 41
 Vielfachinstrument 120
 Vier-Draht-Widerstandsmessung 130
 Vierleitersystem 169
 Viertelbrücke 137, 157
 Villard-Schaltung 109
 Vollbrücke 138
 Volt 25

W

Wechselanteil 103
 Wechselspannungs-Messbrücken 153
 Wheatstone-Brücke 132
 Widerstandsmessung
 2-Draht- 130
 4-Draht- 130
 Konstantstromspeisung 129
 Messbrücken 131
 spannungsrichtige Schaltung 126
 Strom- und Spannungsmessung
 125
 stromrichtige Schaltung 125
 Vergleich mit Referenzwiderstand
 127
 Wirkleistung 166
 Wirkleistungsmessung 82, 173, 177,
 183

Z

Zähler 240
 asynchroner Dual- 240
 BCD- 242
 synchroner Dual- 241
 Zangenleistungsmessgerät 182
 Zeitintervallmessung 242

- Auflösung 243
- Genauigkeit 243
- Periodendauermessung 245
- Zeitkonstante 58, 62
- Zeitmessung 217
 - analoge 256
 - digitale 242
- Zeitsignalsender 26, 246
 - Codierung 247
 - Modulation 247
- Zenerdiode 101
- Zwei-Draht-Widerstandsmessung
 - 130, 163, 294, 295, 296, 297, 298,
301, 302, 303, 304, 305
- Zweikanaloszilloskop 205