

Inhalt – Übersicht – Band 2

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	LXXI
13. Schaltungen mit über das Gate abschaltbaren Bauelementen	1619
13.1 Gleichstromsteller	1619
13.2 Wechselrichter	1638
13.3 Zusammenfassung	1659
13.4 Literatur	1659
14. Optimierung von Netzrückwirkungen und Lastharmonischen	1661
14.1 Allgemeines	1661
14.2 Einphasige netzrückwirkungsarme (Puls-)Gleichrichterschaltungen	1662
14.3 Dreiphasige (Puls-)Gleichrichterschaltungen mit geringen Netzrückwirkungen	1696
14.4 Vienna Rectifier	1708
14.5 Analyse der dreiphasigen AC–DC-Pulsumrichter – Raumzeigerdarstellungen, Grund- und Oberschwingungen	1740
14.6 Sieb- und Gleichrichterschaltungen	1772
14.7 Methoden für die Stromrippelminimierung	1799
14.8 Auswirkung von Welligkeiten auf der Lastseite auf Regelungen	1815
14.9 Literatur	1818
15. Passive Bauelemente und Dimensionierungsbeispiele	1823
15.1 Magnetische Bauteile und Schaltungsdimensionierung	1823
15.2 Skin- und Proximityeffekte in Transformatorwicklungen	1889
15.3 Ferritkerne in Transformatoren von Schaltnetzteilen und Minimierung der Verluste	1913
15.4 Leistungsübertrager und Spulen – Entwurf und Dimensionierung	1924
15.5 Berechnung und Minimierung von Streuinduktivitäten	1950
15.6 Kondensatoren	1963
15.7 Magnetische Materialien und Kondensatoren – Begriffe	1974
15.8 Literatur	2000
Anhang 15A. Übertragbare Transformatorleistung, Faktoren C und K_i sowie Rhombusdiagramm	2003
16. Spezielle Methoden und Anwendungen	2039
16.1 Überblick und typische Beispiele	2039
16.2 Sperrschwingwandler	2069
16.3 Schaltungen für Beleuchtungstechnik und PFC	2092
16.4 Matrixumrichter	2157
16.5 Solarkonverter	2175
16.6 Verstärker	2202
16.7 Netzgekoppelte Pulsumrichter – Aktive Rippelkompensation	2252
16.8 Leistungselektronik im KFZ	2291

16.9 Beeinflussungen der Arbeitsweise	2333
16.10 Literatur	2414
17. Neuere Methoden der elektromagnetischen Verträglichkeit, CE-Kennzeichnung	2423
17.1 Allgemeines	2423
17.2 EMV-Analyse und Störempfindlichkeit (Passive EMV)	2427
17.3 Kopplungsmechanismen	2433
17.4 Störquellen (Aktive EMV)	2445
17.5 Störsignale an der Störsenke (Passive EMV)	2460
17.6 Reduktion von Störungen (der aktiven EMV) und Erhöhung der Störfestigkeit (der passiven EMV)	2470
17.7 EMV-Normung und CE-Kennzeichnung	2504
17.8 Normgerechte Prinzipien zur EMV-Störfestigkeitsmessung	2521
17.9 Normgerechte Prinzipien zur Störaussendungsmessung	2536
17.10 Einteilungsgrundsätze der Störungsarten und praktische Hinweise	2549
17.11 Historische Entwicklung der Funkstörnormen und aktuelle Normwerte	2561
17.12 Beeinflussung von Nachrichtenleitungen durch Schaltungen der Leistungselektronik – Analytische Berechnung	2566
17.13 Literatur	2606
Namen- und Sachverzeichnis	2611
Verzeichnis der Tafeln und Tabellen	2785
Anhang 4F. Tabelle zu Abb. 4.60 und 4.62 (Drehstromsteller)	2791
Anhang 5A. Kreisstrommittelwert	2792
Anhang 11A. Details zu Abb. 11.27	2815
Anhang 12A. Ergänzungen zu Kapitel 12	2818
Anhang 12B. Simulationen und detaillierte Analysen zu Abschnitt 12.1.	2825
Anhang 12C. Buck-Konverter: MW-Stromregelung im lückenden Betrieb	2902
12C.6 Literatur	2920
Anhang 12D. Boost-Konverter: SW-Stromregelung im lückenden Betrieb	2922
12D.4 Literatur	2927
Anhang 12E. Nachbetrachtung zu Regelungen und Übertragungsfunktionen	2929
Anhang 13A. Verlustlose Turn-On- und Turn-Off- (Snubber-)Netzwerke	2933
13A.8 Literatur	2970
Anhang 13B. u-Z-Diagramm	2971

Inhaltsverzeichnis Band 2

Wichtige Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	LXXI
---	------

13. Schaltungen mit über das Gate abschaltbaren Bauelementen	1619
---	-------------

13.1 Gleichstromsteller	1619
13.1.1 MGD/GTO-Gleichstromsteller – Allgemeines	1619
13.1.2 Beschaltungen für MGDs/GTOs in Gleichstromstellerschaltungen	1620
13.1.2.1 Standard-RCD-Beschaltung	1621
13.1.2.2 Verlustarme LCD-Beschaltung	1627
13.1.3 Spezieller Gleichstromsteller	1634
13.2 Wechselrichter	1638
13.2.1 Allgemeines	1638
13.2.2 Beschaltung von Ventilen in Wechselrichterschaltungen	1639
13.2.2.1 Wechselrichter mit RCD-Beschaltung	1640
13.2.2.1.1 Ausschalten eines Ventils	1641
13.2.2.1.2 Einschalten eines Ventils	1643
13.2.2.2 Symmetrische Wechselrichterbeschaltung (nach McMurray)	1646
13.2.2.3 Unsymmetrische Wechselrichterbeschaltung	1650
13.3 Zusammenfassung	1659
13.4 Literatur	1659

14. Optimierung von Netzzrückwirkungen und Lastharmonischen	1661
--	-------------

14.1 Allgemeines	1661
14.2 Einphasige netzzrückwirkungsarme (Puls-)Gleichrichterschaltungen	1662
14.2.1 Leistungskreise	1662
14.2.1.1 Einführung	1662
14.2.1.2 Gleichrichter mit nachgeschaltetem Hochsetzsteller (Boost-Konverter)	1666
14.2.1.2.1 Hochsetzsteller ohne Potentialtrennung	1666
A. Eigenschaften der Schaltung	1666
B. Vorteile	1667
C. Nachteile	1667
14.2.1.2.2 Hochsetzsteller mit Potentialtrennung	1667
14.2.1.3 Nachgeschalteter Tiefsetzsteller (Buck-Konverter)	1668
A. Eigenschaften und Beschreibung der Schaltung	1668
B. Vorteile	1670
C. Nachteile	1670
14.2.1.4 Nachgeschalteter Spannungsinverter (Buck-Boost-Konverter)	1671
A. Eigenschaften der Schaltung	1671
B. Vorteile	1672
C. Nachteile	1673
14.2.1.5 Nachgeschalteter Sperrwandler (Flyback-Konverter)	1673
A. Eigenschaften der Schaltung	1673

B. Vorteile	1674
C. Nachteile	1674
14.2.1.6 Nachgeschalteter SEPIC(-Konverter)	1674
A. Eigenschaften der Schaltung	1674
B. Vorteile	1674
C. Nachteile	1674
14.2.2 Regelungskonzepte für einphasige netzrückwirkungsarme Gleichrichterstrukturen	1675
14.2.2.1 Bestimmung der Einschaltdauer mit Hilfe eines Rampengenerators und des Einschaltzeitpunktes durch Nullstromdetektion (Betrieb an der Lückgrenze)	1675
A. Erklärung der einzelnen Schaltungsteile	1678
a) Stromversorgung und Energiesteuerung	1678
b) Stromdetektion (Nullstromerfassung)	1679
c) Abschaltung bei Überstrom	1679
d) Rampengenerator (= Sägezahngenerator)	1679
e) Steuerung der Einschaltdauer	1679
f) Ausgangstreiber	1679
B. Funktion der Schaltung im Betrieb	1680
14.2.2.2 Bestimmung der Einschaltdauer über Spitzenwert-Stromregelung und des Einschaltzeitpunktes durch Nullstromdetektion (Betrieb an der Lückgrenze)	1681
14.2.2.3 Bestimmung der Einschaltdauer durch Mittelwert-Stromregelung und des Einschaltzeitpunktes über feste Taktperiode (nichtlückender Betrieb)	1683
a) Spannungsregler (mit OPV ₂)	1685
b) Multiplizierer zum Berechnen des Stromsollwertes aufgrund der folgenden gemessenen Werte	1686
c) Stromregler (mit OPV ₁)	1686
d) Oszillatorschaltung	1686
e) PWM-Generator	1686
f) Steuerlogik	1686
g) Softstart-Schaltung	1686
h) Überspannungsschutz	1686
i) Überstromschutz	1686
j) Kontrollschaltung für die Spannungsversorgung des ICs	1686
Genauere Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke und Dimensionierung der externen Bauteile	1687
A. Spannungsregler	1687
B. Multiplizierschaltung	1687
C. Stromregler	1689
14.3 Dreiphasige (Puls-)Gleichrichterschaltungen mit geringen Netzzrückwirkungen	1696
14.3.1 Übersicht	1696
14.3.1.1 Diodenbrückenschaltung mit (auf Gleichstromseite) nachgeschaltetem Hochsetzsteller	1697
14.3.1.2 Diodenbrücke und Hochsetzstellerstruktur mit Induktivitäten auf der Wechselstromseite	1698
14.3.1.3 Hochsetzstellerstruktur mit sechs abschaltbaren Leistungshalbleitern (mit Energierückspeisung)	1698
14.3.1.4 Hochsetzstellerstruktur mit drei netzseitigen Induktivitäten und drei bidirektionalen abschaltbaren Halbleiterschaltern (ohne Energierückspeisung)	1699
14.3.2 Genauere Beschreibung der Leistungskreise und Steuerungen	1700

14.3.2.1	Diodenbrückenschaltung mit nachgeschaltetem Hochsetzsteller	1700
14.3.2.2	Diodenbrückenschaltung und Hochsetzsteller mit netzseitigen Induktivitäten	1703
14.3.2.3	Struktur mit drei bzw. sechs (abschaltbaren) Leistungsschaltern	1707
14.4	Vienna Rectifier	1708
14.4.1	Vienna Rectifier I	1709
14.4.2	Vienna Rectifier II	1720
14.4.3	Zusammenfassung	1739
14.5	Analyse der dreiphasigen AC–DC-Pulsumrichter – Raumzeigerdarstellungen, Grund- und Oberschwingungen	1740
14.5.1	Allgemeines	1740
14.5.2	Umrichterspannung – makroskopische Betrachtung	1741
14.5.3	Systembeschreibung über Raumzeiger	1745
14.5.4	Umrichterspannung – mikroskopische Betrachtung	1747
14.5.5	Ausgangsspannung und Oberschwingungen bei Pulsbetrieb	1748
14.5.6	Aufspaltung des Freilaufzustandes	1753
14.5.7	Erhöhung des Aussteuerbereiches	1758
14.5.8	Raumzeigermodulation	1762
14.5.9	Raumzeiger für Dreiniveausysteme	1768
14.6	Sieb- und Gleichrichterschaltungen	1772
14.6.1	Gleichrichterschaltungen	1772
14.6.1.1	Grundtypen von Gleichrichterschaltungen	1772
14.6.1.1.1	Halbwellegleichrichter (Einweggleichrichter)	1772
14.6.1.1.2	Zweiweggleichrichter	1774
14.6.1.1.3	Brückengleichrichter	1774
14.6.2	Siebschaltungen – Allgemeines	1776
a)	<i>R</i> -Gleichrichter	1776
b)	<i>C</i> -Gleichrichter	1776
c)	<i>L</i> -Gleichrichter	1776
14.6.2.1	Strom- und Spannungskomponenten	1776
a)	<i>R</i> -Gleichrichter	1777
b)	<i>C</i> -Gleichrichter	1777
c)	<i>L</i> -Gleichrichter	1777
14.6.2.2	Grundfrequenzen der Brummgrößen	1777
14.6.2.3	Berechnungsgrundlagen für die Brummspannung	1778
a)	<i>R</i> -Gleichrichter	1778
b)	<i>C</i> -Gleichrichter	1778
c)	<i>L</i> -Gleichrichter	1778
14.6.2.4	Frequenzkomponenten der Brummspannung	1779
14.6.2.5	Kenngößen von Siebschaltungen	1779
a)	Welligkeit der Momentanwerte	1779
b)	Welligkeit der Effektivwerte	1779
c)	Welligkeitsverhältnis der Momentanwerte	1780
d)	Siebfaktor	1780
e)	Frequenzabhängigkeit des Eingangswiderstandes der Siebschaltung . . .	1780
14.6.2.6	Vierpoleigenschaften	1780
14.6.2.7	Siebschaltungen bei zeitlich wechselnder Last	1782
14.6.3	Siebschaltungen – Spezielle Ausführungsformen	1782
14.6.3.1	Tiefpaß- <i>L</i> – <i>C</i> -Ketten	1782
1.	Starkstromtechnische Dimensionierung	1783
2.	Dimensionierung für kleine Leistungen	1783
14.6.3.2	<i>L</i> – <i>C</i> -Siebketten-Dimensionierung	1784

14.6.3.3 Tiefpaß- <i>R</i> – <i>C</i> -Ketten	1788
14.6.3.4 Frequenzsperrern	1789
14.6.3.5 <i>R</i> – <i>C</i> -Frequenzsperrern (Doppel- <i>T</i> -Glieder)	1791
14.6.3.6 Elektronische (aktive) Filter	1792
14.7 Methoden für die Stromrippelminimierung	1799
14.7.1 Ćuk-Konverter mit gekoppelten Spulen	1799
14.7.1.1 Umformung der Struktur	1799
14.7.1.2 Filterwirkung und Rippelunterdrückung	1802
14.7.1.3 Erklärung der Rippelunterdrückung anhand des Superpositionsprinzips	1803
14.7.2 Hochsetzsteller mit reduziertem Eingangsstromrippel	1804
14.7.2.1 Schaltkreisanalyse	1804
14.7.2.2 Vor- und Nachteile der Realisierungsvarianten eines Hochsetzstellers mit reduziertem Rippel	1806
14.7.3 Ćuk-Konverter mit reduziertem Rippel ohne gekoppelte Spulen	1807
14.7.3.1 Ćuk-Konvertertopologien „ohne“ Stromrippel	1807
14.7.3.2 Einfluß eines Spannungsrippels am Koppelkondensator auf den Strom- rippel	1807
14.7.3.3 Vor- und Nachteile der Ćuk-Konverter mit reduziertem Stromrippel	1811
14.7.4 Buck- und Boostkonverter mit integriertem Filter	1811
14.7.5 SEPIC(-Konverter) mit reduziertem Eingangsstromrippel	1812
14.8 Auswirkung von Welligkeiten auf der Lastseite auf Regelungen	1815
14.9 Literatur	1818
15. Passive Bauelemente und Dimensionierungsbeispiele	1823
15.1 Magnetische Bauteile und Schaltungsdimensionierung	1823
15.1.1 Allgemeines und Anwendungsgebiete	1823
15.1.2 Kernmaterialien und Kernformen	1823
15.1.2.1 Allgemeines	1823
15.1.2.2 Formen des Magnetismus	1824
15.1.2.2.1 Ferromagnetische Metalle	1824
15.1.2.2.2 Diamagnetische Materialien	1826
15.1.2.2.3 Paramagnetische Materialien	1826
15.1.2.2.4 Antiferromagnetismus	1826
15.1.2.2.5 Ferrimagnetismus	1826
15.1.2.2.6 Metamagnetismus	1826
15.1.2.3 Materialstrukturen und Kerntypen	1827
15.1.2.3.1 Kristalline und amorphe Metalle (Verbindungen)	1827
15.1.2.3.2 Ferritkerne	1827
15.1.2.3.3 Pulverkerne	1828
15.1.2.3.4 Eisenkerne	1829
15.1.2.4 Zusammenfassung	1829
15.1.3 Isolier-, Verguß- und Lötwerkstoffe	1829
15.1.4 Wickeldrähte für Transformator- und Spulenwicklungen	1832
15.1.5 Dimensionierung von Transformatoren und weiteren Bauelementen	1832
15.1.5.1 Beispiel: Dimensionierung eines 45 W-Sperrwandlers	1832
15.1.5.1.1 Grundlegende Bemerkungen zur Schaltung	1833
15.1.5.1.2 Betriebsart	1833
15.1.5.1.3 Festlegung des Übersetzungsverhältnisses	1834
15.1.5.1.4 Berechnung der Hauptinduktivität	1836
15.1.5.1.5 Transformatorberechnung	1839
15.1.5.1.6 Transistorspitzenstrom	1851
15.1.5.1.7 Tastverhältnis	1852

15.1.5.1.8	Diodenspitzenstrom	1853
15.1.5.1.9	Leitverluste bei Bipolartransistoren	1853
15.1.5.1.10	Leitverluste bei MOS-Transistoren	1854
15.1.5.1.11	Diodenverluste	1855
15.1.5.1.12	Ausgangskondensator	1859
15.1.5.2	Beispiel: Dimensionierung eines Durchflußwandlers	1861
15.1.5.2.1	Dimensionierung von Gleichrichter und Siebkondensator	1861
15.1.5.2.2	Versorgung der Steuerschaltung	1863
15.1.5.2.3	Dimensionierung der Steuerschaltung	1863
15.1.5.2.4	Unter- und Überspannungsüberwachung	1866
15.1.5.2.5	Auswahl und Berechnung des Transformators	1869
15.1.5.2.6	Berechnung der Drossel	1875
15.1.5.2.7	Ausgangskondensator	1877
15.1.5.3	Drahttabellen (AWG)	1880
15.1.6	Stromverdrängung in Leitern (Skin- und Proximityeffekt)	1883
15.1.7	Anwendung der Lagenisolation und spezielle Bauformen	1884
15.1.8	Aktive Klemmschaltungen	1887
15.1.9	Spulen	1887
15.2	Skin- und Proximityeffekte in Transformatorwicklungen	1889
15.2.1	Skineffekt	1889
15.2.2	Proximityeffekt (Nähewirkung)	1893
15.2.2.1	Doppelleitung	1893
15.2.2.2	Mehrlagige Wicklung	1895
15.2.2.2.1	Verluste bei Folien-(Flachdraht-)Wicklungen (rechteckige Leiter)	1895
15.2.2.2.2	Äquivalenzen zwischen Rund- und Flachdraht	1906
15.2.2.2.3	Verluste bei Runddrahtwicklungen	1909
15.2.2.2.4	Verluste bei nichtsinusförmigen Strömen	1909
15.3	Ferritkerne in Transformatoren von Schaltnetzteilen und Minimierung der Verluste	1913
15.3.1	Ferrite und Bauformen (Beispiele)	1913
15.3.2	Minimierung der Verluste von Schaltnetzteiltransformatoren	1918
15.3.2.1	Spannungsgleichung	1918
15.3.2.2	Leistungsgleichung	1920
15.3.2.3	Wicklungsverluste	1921
15.3.2.4	Kernverluste	1922
15.3.2.5	Minimierung der Verluste	1922
15.4	Leistungsübertrager und Spulen – Entwurf und Dimensionierung	1924
15.4.1	Magnetische Kreise für Energieübertragung und Isolation	1924
15.4.1.1	Allgemeines	1924
a)	Hystereseverluste	1925
b)	Wirbelstromverluste	1925
c)	Resonanzverluste	1925
15.4.1.2	Bestimmung der Schwankungsbereiche der magnetischen Induktion	1927
15.4.1.3	Bestimmung der Kerngröße	1928
15.4.1.4	Berechnung der Windungszahlen	1933
15.4.2	Magnetische Kreise für Anwendungen mit Gleichstromvormagnetisierung bzw. zur Energiezwischenspeicherung	1935
15.4.2.1	Auswahl des Kernmaterials	1935
15.4.2.2	Bestimmung der maximalen Flußdichte	1937
15.4.2.3	Bestimmung der Kerngröße	1937
15.4.2.4	Berechnung der Windungszahl	1939
15.4.2.5	Berechnung des Luftspaltes	1939
15.4.3	Hinweise zum Entwurf von Wicklungen	1941

15.4.3.1 Allgemeines	1941
15.4.3.2 Transformatoren mit Teilwindungen	1943
15.4.3.2.1 Notwendigkeit von Teilwindungen	1943
15.4.3.2.2 Realisierung von Teilwindungen	1944
15.5 Berechnung und Minimierung von Streuinduktivitäten	1950
15.5.1 Allgemeines	1950
15.5.2 Grundgesetze des magnetischen Feldes	1950
15.5.3 Berechnung der Streuinduktivität bei konzentrischen Spulen	1952
15.5.3.1 Grundsätzliches	1952
15.5.3.2 Berechnung auf Basis der magnetischen Energiedichte	1957
15.5.3.3 Berechnung über den Fluß	1958
15.5.3.4 Verschachtelte Wicklungen	1959
15.5.4 Ringkern und Ferritperle	1960
15.5.5 Beziehung zwischen Kernparametern, Luftspaltlängen und A_L -Werten	1962
15.6 Kondensatoren	1963
15.6.1 Grundsätzliches zum Aufbau	1963
a) Allgemeines	1963
b) Elektrolytkondensatoren (Elkos)	1963
c) Kunststofffolienkondensatoren	1965
d) Keramik Kondensatoren	1966
e) Ausblick auf Neuentwicklungen	1966
15.6.2 Auswahlkriterien nach Anwendung	1966
a) Kopplungskondensatoren	1966
b) Glättungs- und Stützkondensatoren	1966
c) Kommutierungskondensatoren	1967
d) Leistungskondensatoren zur Verbesserung von Leistungsfaktor und Oberschwingungsgehalt	1967
e) Schwingkreiskondensatoren	1967
f) Bedämpfungskondensatoren	1968
g) Zwischenkreiskondensatoren	1968
15.6.3 Zusammenschalten mehrerer Kondensatoren	1968
15.6.4 Typische Kennlinien und ihre Bedeutung	1969
15.7 Magnetische Materialien und Kondensatoren – Begriffe	1974
15.7.1 Magnetbauteile	1974
15.7.1.1 Kennwerte, Bezeichnungen und Definitionen	1975
15.7.1.2 Allgemeine Bemerkungen	1991
15.7.1.2.1 Ferromagnetismus – Weißsche Bezirke	1991
15.7.1.2.2 Transformatoren (Übertrager)	1992
15.7.1.2.3 Drosseln – Spulen – Induktivitäten	1992
15.7.1.2.4 Kerne für induktive Sensoren	1992
15.7.1.2.5 Transformatorkernelauswahl für Leistungsanwendungen	1993
a) Definition der Vorgaben	1993
b) Auswahl möglicher Kernformen und Werkstoffe	1993
c) Eingrenzung von Kernform und Werkstoff	1993
15.7.1.2.6 Kernmaterialien	1993
A. Materialgruppen	1993
a) (Kristalline) Eisenmetalle – Dynamoblech	1993
b) Amorphe Metalle	1993
c) Ferrite	1994
d) Pulververbundwerkstoffe	1994
B. Vergleich von (kristallinen) Metallen, Ferriten, Pulververbundwerkstoffen und amorphen Metallen	1995

15.7.1.2.7 Kernbezeichnungen	1995
15.7.2 Kondensatoren	1996
15.7.2.1 Kennwerte, Bezeichnungen und Definitionen	1996
15.7.2.2 Neue Entwicklungen: Superkondensatoren	1997
15.7.2.2.1 Aufbau	1998
15.7.2.2.2 Kenngrößen	1998
15.7.2.2.3 Typische Kennwerte	1999
15.7.2.2.4 Anwendungen – Einsatzmöglichkeiten	1999
15.7.2.3 Weiterführende Literatur	2000
15.8 Literatur	2000
Anhang 15A. Übertragbare Transformatorleistung, Faktoren C und K_i sowie Rhombusdiagramm	2003
15A.1 Berechnungsgrundlagen	2003
15A.2 (Charakteristische) Faktoren für Transformatoren für typische Schaltungen	2009
15A.2.1 Eintaktdurchflußwandler	2009
15A.2.2 Seriengespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Brückengleichrichtung	2011
15A.2.3 Seriengespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Mittelpunktschaltung	2012
15A.2.4 Parallelgespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Brückengleichrichtung	2013
15A.2.5 Parallelgespeiste Gegentaktschaltung mit sekundärseitiger Mittelpunktschaltung	2015
15A.2.6 Sperrwandler	2016
15A.3 Ableitungen der Transformatorgleichungen	2017
15A.3.1 Sperrwandler	2017
15A.3.2 Durchflußwandler und verwandte Strukturen	2021
15A.4 Rhombusdiagramm	2023
16. Spezielle Methoden und Anwendungen	2039
16.1 Überblick und typische Beispiele	2039
16.1.1 Allgemeines	2039
16.1.2 Stromversorgungen für höhere Leistungen	2040
16.1.2.1 Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV)	2040
16.1.2.2 Pulsleichrichter bzw. -umrichter	2041
16.1.3 Erzeugung von Wechselspannungen mit optimiertem Oberschwingungsgehalt	2042
a) Multilevel-Synthese	2043
b) Pulsbreiten- oder Pulsweiten-Synthese	2043
16.1.4 Antriebstechnik	2046
16.1.4.1 Gleichstromantriebe	2046
16.1.4.1.1 DC-Motor im Zwei- und Vierquadrantenbetrieb	2046
16.1.4.1.2 Feldstromversorgung von Gleichstrommaschinen	2048
16.1.4.2 Wechselstromantriebe	2048
16.1.5 Schaltentlastung und Erzeugung von Gleichspannungen	2051
16.1.5.1 Allgemeines	2051
16.1.5.2 Gleichspannungs-(DC–DC-)Konverter mit Schaltentlastung	2052
16.1.6 Verbesserung des Schaltverhaltens	2057
16.1.6.1 Allgemeines	2057
16.1.6.2 Hartes Schalten	2058
16.1.6.3 ZVS	2058
16.1.6.4 ZCS	2059
16.1.6.5 Einfluß von Streukapazitäten und -induktivitäten	2061

- 16.1.7 Weitere Anwendungen und Schaltungsaspekte 2065
 - 16.1.7.1 Induktionsheizung 2065
 - 16.1.7.2 Schweißtechnik 2068
 - 16.1.7.3 Ansteuerungsprobleme 2068
 - 16.1.7.4 Weitere Anwendungen 2069
- 16.2 Sperrschwingwandler 2069
 - 16.2.1 Allgemeines 2069
 - 16.2.2 Dimensionierung und Simulation eines konkreten Beispiels 2071
 - 16.2.2.1 Dimensionierung 2071
 - 16.2.2.2 Ergebnisse der Simulation 2073
 - 16.2.2.3 Detaillierte Betrachtung des Umschaltvorgangs zwischen Entlade- und Ladephase 2074
 - 16.2.3 Modifizierte Schaltung 2075
 - 16.2.3.1 Schaltungsauslegung 2075
 - 16.2.3.2 Nachdimensionierung der Schaltung 2076
 - 16.2.4 Berücksichtigung einer Streuinduktivität im Ladekreis 2078
 - 16.2.4.1 Allgemeines 2078
 - 16.2.4.2 Funktion der Transistorschutzschaltung 2079
 - 16.2.5 Abhängigkeit der Ausgangsspannung U_{La} vom Lastwiderstand R_{La} 2084
 - 16.2.6 Modellparameter für PSPICE 2086
- 16.3 Schaltungen für Beleuchtungstechnik und PFC 2092
 - 16.3.1 Allgemeines 2092
 - 16.3.2 Typen von Entladungslampen 2092
 - 16.3.3 Aufbau und Betriebsverhalten der Leuchtstoffröhren als Beispiel für Niederdruck-Entladungslampen 2093
 - 16.3.4 Ansteuerschaltungen für den Betrieb von Niederdruck-Entladungslampen – Allgemeines 2095
 - 16.3.5 Konventionelle Vorschaltgeräte 2095
 - 16.3.6 Elektronische Vorschaltgeräte – Allgemeines 2096
 - 16.3.7 Schaltungen von Vorschaltgeräten mit Gleichspannungseingang 2097
 - 16.3.7.1 Elektronisches Vorschaltgerät mit selbstschwingender Brücke 2098
 - 16.3.7.1.1 Allgemeine Erklärung der Schaltungsfunktion und Erläuterungen zur Bauteildimensionierung 2098
 - 16.3.7.1.2 Herleitung der Schaltungsstruktur 2099
 - 16.3.7.1.3 Anschwingen der Wechselrichterhalbbrücke vor dem Zünden der Lampe 2100
 - 16.3.7.1.4 Verhalten nach dem Zünden 2100
 - 16.3.7.2 Elektronisches Vorschaltgerät mit integrierter Ansteuerschaltung 2106
 - a) Oszillatorschaltung 2107
 - b) Steuerlogik 2108
 - c) Totzeitglied (T_t) 2108
 - d) Pegelwandler 2108
 - e) Oberer Halbbrückentreiber 2108
 - 16.3.7.3 Vorkehrungen zur Optimierung des Netzverhaltens (Aspekte zum Netzverhalten) 2109
 - 16.3.8 Ansteuerschaltungen (ICs) für Leuchtstofflampen 2110
 - 16.3.8.1 Allgemeines 2110
 - 16.3.8.2 PFC-Eingangsstufe 2113
 - 16.3.8.3 Vorschaltgerät 2116
 - 1. UVLO-Modus 2118
 - 2. Vorheizen 2119
 - 3. Zündphase 2119

4. Arbeitsphase (Dimmphase)	2121
16.3.8.4 Spannungsversorgungen und Ansteuerfunktionen	2121
16.3.8.4.1 Prinzipielle Arbeitsweise	2121
16.3.8.4.2 Zusätzliche Funktionen	2123
a) Dimmodus	2123
b) Strommessung	2123
c) Fehlermodus	2123
16.3.9 Einstufen-Power-Factor-Correction (PFC) mit regelbarer Ausgangsgleichspannung und Induktivität im Eingangskreis	2124
16.3.9.1 Einleitung	2124
16.3.9.2 Schaltungsanalyse	2125
16.3.9.2.1 Allgemeines	2125
16.3.9.2.2 Betriebszustände	2126
16.3.9.3 Zusammenfassung	2130
16.3.9.3.1 Kondensatorstrom und -spannung	2130
16.3.9.3.2 Leitdauer	2130
16.3.10 Einstufige Lampenansteuerungen mit integrierter PFC ohne Induktivität im Eingangskreis	2131
16.3.10.1 Einführung	2131
16.3.10.2 Spannungsquellenprinzip	2133
16.3.10.2.1 Allgemeines	2133
16.3.10.2.2 PFC-Funktion	2135
16.3.10.2.3 Inverterfunktion	2140
16.3.10.3 Stromquellenprinzip	2145
16.3.10.4 Kombiniertes Strom- und Spannungsquellenprinzip	2154
16.3.10.5 Anmerkung zum Betriebsverhalten und zur Dimensionierung	2156
16.4 Matrixumrichter	2157
16.4.1 Grundidee	2157
16.4.1.1 Entwurf und einphasige Last	2158
16.4.1.2 Dreiphasige Last	2162
16.4.2 Realisierungsmöglichkeiten	2165
16.4.2.1 Idealisierte Pulsmuster	2165
16.4.2.2 Schaltelemente und Steuerung	2168
16.4.3 Versuchsergebnisse	2173
16.4.4 Zusammenfassung	2173
16.5 Solarkonverter	2175
16.5.1 Einleitung	2175
16.5.1.1 Historisches und Allgemeines	2175
16.5.1.2 Wirkungsgrad und energetische Amortisation	2175
16.5.2 Solarzellen	2176
16.5.2.1 Aufbau	2176
16.5.2.2 Ersatzschaltbilder	2177
16.5.2.3 Kennlinien der Solarzelle	2179
16.5.2.3.1 Dunkelkennlinie	2179
16.5.2.3.2 Kennlinie der bestrahlten Solarzelle	2179
16.5.2.4 Arbeitspunkt von Solarzellen	2181
16.5.3 Energiespeicher	2182
16.5.4 Laderegler	2183
16.5.4.1 Serienregler	2184
16.5.4.2 Shuntregler	2184
16.5.5 Anpaßwandler	2185
16.5.6 MPP-Tracker	2187

16.5.6.1	Arbeitsprinzipien von MPP-Trackern	2188
16.5.6.1.1	Indirekte MPP-Tracker (Vorsteuerung)	2188
a)	Jahreszeitabhängige Nachführung (Umschaltung) der Solarpaneelspannung	2188
b)	Temperaturgeführte Arbeitspunktspannung	2188
c)	Messung der Solargeneratorerlaufspannung	2188
16.5.6.1.2	Direkte MPP-Tracker (Regelung)	2188
16.5.6.2	MPP-Tracker beim Laden von Akkumulatoren	2188
16.5.7	Wechselrichter	2190
16.5.7.1	Anforderungen	2190
16.5.7.2	Konzepte	2191
16.5.7.3	Anpassung Solargenerator – Wechselrichter	2193
16.5.8	Photovoltaiksysteme	2194
16.5.8.1	Autarke Photovoltaikanlagen bzw. Inselssysteme	2194
16.5.8.2	Netzgekoppelte Systeme	2196
16.5.9	Trends	2198
16.5.9.1	Allgemein	2198
16.5.9.2	Inselanlagen	2198
16.5.9.3	Netzgekoppelte Anlagen	2198
16.5.10	Normen und Vorschriften	2199
16.5.11	Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen	2199
16.5.12	ISO 14000 – Einführung in die Photovoltaikindustrie	2201
16.5.12.1	Markante Punkte der Norm ISO 14000	2202
16.5.12.2	Schlüsselmerkmale der Norm ISO 14001	2202
16.5.12.3	Wichtige Aspekte von ISO 14001 zu Umweltfragen	2202
16.6	Verstärker	2202
16.6.1	Einleitung	2202
16.6.2	Leistungsverstärker im D-Betrieb	2203
16.6.2.1	Allgemeines und Schaltverstärker mit Halbbrücke	2203
16.6.2.2	Schaltverstärker in Multizellenstruktur (Multicellverstärker) mit Vollbrücken	2208
16.6.2.3	Strom- und Spannungsregelung	2212
16.6.2.3.1	Allgemeines	2212
16.6.2.3.2	Modellbildung und grundsätzliche Voraussetzungen	2212
16.6.2.3.3	Dimensionierung des Reaktanzfilters	2217
16.6.2.3.4	Kaskadierte Strom-/Spannungsregelung	2219
16.6.2.3.5	Dimensionierung des Stromreglers	2220
a)	Allgemeines	2220
b)	Zusammenhang zwischen den Kenngrößen	2223
c)	Phasenminimumsysteme	2224
d)	Bodediagramm	2224
e)	Bestimmung der Reglerparameter k_I und T_I unter Beachtung der Beschränkung der Durchtrittsfrequenz des Stromregelkreises	2225
16.6.2.3.6	Dimensionierung des Spannungsreglers	2230
16.6.2.4	Asymmetrischer Leistungs-Schaltverstärker (ALS-Verstärker)	2234
16.6.2.4.1	Prinzipielle Funktionsweise	2234
16.6.2.4.2	Dimensionierung des Ausgangsfilters	2240
16.6.2.4.3	Regelung	2240
16.6.3	Kombination von Schalt- und Linearverstärkern	2241
16.6.3.1	Allgemeines	2241
16.6.3.2	Direkte Kopplung von linearem und schaltendem Verstärker	2241

16.6.3.3 Asymmetrischer Leistungs-Schaltverstärker mit hybridem Ausgangsfilter	2245
16.6.4 Verstärker für Audiosysteme und weitere Anwendungen	2247
16.6.4.1 Allgemeines zur Klassifizierung von Leistungsverstärkern	2247
16.6.4.2 Klasse E-Verstärker (für frequenzabgestimmte Systeme, z. B. Sender)	2249
16.7 Netzgekoppelte Pulsumrichter – Aktive Ripplekompensation	2252
16.7.1 Einleitung	2252
16.7.2 Grundkonzepte, netz- und schaltfrequente Oberschwingungen	2254
16.7.3 Kopplungsstufe	2262
16.7.4 Regelung der Filterumrichterspannung	2264
16.7.5 Signalrippelfilter (SRF)	2267
16.7.6 Filterstromregelung	2271
16.7.7 Spannungsregelung für den Filterumrichter	2275
16.7.8 Niederfrequente Schwingungen und Regelung des Hauptumrichters	2276
16.7.9 Anwendung der Multizellenstruktur	2281
a) Stromregelung	2281
b) Abblockkondensator C_K	2283
c) Dämpfungswiderstand R_D	2285
d) Verlustabdeckung	2286
e) Signalrippelfilter (SRF)	2287
16.7.10 Zusammenfassung	2288
16.8 Leistungselektronik im KFZ	2291
16.8.1 Einleitung	2291
16.8.2 Spannungsregelung im KFZ	2291
16.8.2.1 Konventionelle Linearregler	2292
16.8.2.2 Linearregler mit kleinem Spannungsabfall LDO (= Low Drop Out)	2293
16.8.2.3 Betrachtung des LDO-Regelkreises	2294
16.8.2.4 Überbrückung von Spannungseinbrüchen	2299
16.8.2.5 Spannungsregler mit hoher Zuverlässigkeit und geringen Störungen	2301
16.8.3 Ansteuerung von Magnetventilen (z. B. für elektronische Einspritzung)	2301
16.8.3.1 Allgemeines	2301
16.8.3.2 Magnetventilansteuerung mit L9140	2302
16.8.4 Antriebssysteme mit Brennstoffzellen	2304
16.8.4.1 Allgemeines	2304
16.8.4.2 Bidirektionaler DC–DC-Konverter	2305
16.8.5 Pulswechselrichter	2308
16.8.5.1 Allgemeines	2308
16.8.5.2 Multizellenkonverter	2308
16.8.5.3 Multilevelkonverter	2312
16.8.6 Bordnetze mit 42 V	2314
16.8.6.1 Allgemeines	2314
16.8.6.2 DC–DC-Konverter für 42 V-Bordsysteme	2314
16.8.6.3 Smart Power Devices	2317
16.8.6.3.1 Sicherheitseinrichtungen	2317
16.8.6.3.2 Active Clamping	2319
16.8.6.3.3 Unterbrechung der Masse	2319
16.8.7 Beleuchtungstechnik	2320
16.8.8 Brennstoffzellen	2321
16.8.8.1 Einleitung	2321
16.8.8.2 Brennstoffzellensysteme	2324
16.8.8.3 DMFC	2325
16.8.8.3.1 Einleitung	2325

16.8.8.3.2 Funktionsweise	2325
16.8.8.3.3 Stationäre Kennlinien	2327
16.8.8.4 Dynamisches Verhalten der Brennstoffzellen	2329
16.8.8.5 DMFC-Antrieb	2331
16.9 Beeinflussungen der Arbeitsweise	2333
16.9.1 Allgemeines	2333
16.9.2 Wechselrichterkippen und Überströme zufolge Netzspannungseinbrüchen und -ausfällen bei netzgeführten Systemen	2333
16.9.3 Umrichterfehler und Möglichkeiten zur Korrektur	2339
16.9.3.1 Ursachen von Umrichterfehlern	2339
a) Schaltzeitenfehler	2339
b) Ventilspannungsfehler	2340
16.9.3.2 Korrekturmaßnahmen	2344
16.9.4 Einfluß von Streuinduktivitäten	2344
16.9.4.1 Gegentaktwandler	2344
16.9.4.2 Stromverdopplerschaltung	2365
16.9.5 Einfluß der Magnetisierungsströme	2380
16.9.6 Entlastungsschaltungen – Reduktion von Schaltverlusten und Einfluß parasi- tärer Elemente	2404
16.10 Literatur	2414
17. Neuere Methoden der elektromagnetischen Verträglichkeit, CE-Kennzeichnung	2423
17.1 Allgemeines	2423
17.1.1 Grundlegende Begriffsdefinitionen	2424
17.1.2 Störfestigkeit (Passive EMV)	2425
17.1.3 Störaussendungen (Aktive EMV)	2426
a) Funkstörspannung	2426
b) Funkstörfeldstärke	2426
c) Funkstörleistung	2427
d) Funkstörstrahlungsleistung	2427
e) Netzüberschwingungen	2427
f) Netzspannungsschwankungen	2427
17.1.4 Zusammenfassung	2427
17.2 EMV-Analyse und Störempfindlichkeit (Passive EMV)	2427
17.2.1 Theoretische EMV-Analyse	2428
1. Beugungsmethode	2429
2. Momentenmethode	2429
3. Finite Elemente- bzw. Differenzen-Methode	2430
17.2.2 EMV-Funktionstest	2430
17.2.3 Betrachtete physikalische Größen	2431
A. Absolute Pegel	2432
a) Störpegel	2432
b) Störschwellenpegel	2432
c) Nutzpegel	2432
B. Relative Pegel	2432
a) Störabstand	2432
b) Störsicherheitsabstand	2432
17.2.4 Zusammenfassung	2432
17.3 Kopplungsmechanismen	2433
17.3.1 Störungskopplung – Grundlagen	2433
a) Gleichtaktstörungen	2435
b) Gegentakstörungen	2435

17.3.2	Galvanische Kopplung	2436
17.3.2.1	Galvanische Kopplung zwischen Betriebsstromkreisen	2437
17.3.2.2	Masseschleifenkopplung	2438
17.3.3	Kapazitive Kopplung	2438
17.3.4	Induktive Kopplung	2439
17.3.5	Elektromagnetische Kopplung	2441
17.3.5.1	Wellenleiterkopplung	2441
17.3.5.2	Strahlungskopplung	2442
17.3.6	Identifikation von Kopplungsmechanismen	2444
17.4	Störquellen (Aktive EMV)	2445
17.4.1	Einteilung nach dem Spektrum	2446
17.4.2	Schmalbandige Störquellen	2446
17.4.2.1	Systeme mit Netzzrückwirkungen – Allgemeines	2446
17.4.2.2	Leistungselektronische Schaltungen	2448
17.4.2.3	HF-Generatoren	2449
17.4.2.4	Starkstromleitungen	2450
17.4.3	Intermittierende Breitbandstörquellen	2450
17.4.3.1	Grundstörpegel („Elektrosmog“)	2450
17.4.3.2	Kommutatormotoren	2450
17.4.3.3	KFZ-Zündanlagen	2451
17.4.3.4	Gasentladungslampen	2451
17.4.3.5	Hoch- und Mittelspannungsfreileitungen	2451
17.4.4	Transiente Breitbandstörungen	2452
17.4.4.1	Elektrostatische Entladungen	2452
17.4.4.2	Geschaltete Induktivitäten	2454
17.4.4.3	Transienten in Versorgungsnetzen	2456
17.4.4.4	Blitze – LEMP	2456
17.4.4.5	High Energy Electromagnetic Pulse – HEMP	2458
17.4.5	Umgebungsklassen	2458
17.4.5.1	Leitungsgebundene Störungen	2459
17.4.5.2	Störstrahlung	2460
17.5	Störsignale an der Störsenke (Passive EMV)	2460
17.5.1	Auswirkung auf Bauelemente	2460
17.5.2	Störfestigkeit bei analogen Signalen	2462
17.5.3	Störfestigkeit bei digitalen Signalen	2462
17.5.4	Ermittlung der Störfestigkeit durch Prüfungen	2464
17.5.4.1	Simulation leitungsgebundener Störungen	2465
a)	Breitbandige energiearme Schaltspannungsstörungen (Bursts)	2465
b)	Breitbandige energiereiche Überspannungen (Surges)	2465
c)	Niederfrequenzstörungen in Niederspannungsnetzen (ms-Impulse)	2467
d)	Elektrostatische Entladungen	2467
e)	Schmalbandige Störungen	2468
17.5.4.2	Simulation quasistationärer und transientser Felder (elektromagnetischer Wellen)	2468
a)	Schmalbandige Störfelder	2468
b)	Breitbandige elektromagnetische Wellenfelder	2469
c)	Simulation quasistationärer Felder (elektromagnetischer Wellen) durch Strominjektion	2469
17.6	Reduktion von Störungen (der aktiven EMV) und Erhöhung der Störfestigkeit (der passiven EMV)	2470
17.6.1	Allgemeines	2470
17.6.2	Optimierung der Leitungsführung	2471

- 17.6.2.1 Leitungstypen 2471
 - 17.6.2.2 Verlegung des Bezugspotentials (Erd- und Masseleitungen) 2471
 - 17.6.2.3 Verlegung von Signalleitungen 2474
 - 17.6.2.4 Verlegung von Versorgungsleitungen 2476
- 17.6.3 Filterung 2478
 - 17.6.3.1 Filterarten 2479
 - 17.6.3.2 Aufbau von Filtern 2480
 - 17.6.3.3 Entstörfilter 2484
- 17.6.4 Überspannungsableiter 2490
- 17.6.5 Optokoppler und Lichtleiter 2491
- 17.6.6 Trenntransformatoren 2491
- 17.6.7 Differenzverstärker 2491
- 17.6.8 Allgemeine Maßnahmen gegen kapazitive Kopplung 2493
- 17.6.9 Allgemeine Maßnahmen gegen induktive Kopplung 2494
- 17.6.10 Maßnahmen bei Wellenleiter- und Strahlungskopplung 2494
 - 17.6.10.1 Allgemeines 2494
 - 17.6.10.2 Elektromagnetische Schirme 2495
 - 17.6.10.2.1 Berechnung mittels Impedanzkonzeptes 2496
 - 1. Reflexionsdämpfung R 2496
 - 2. Absorptionsdämpfung A 2498
 - 3. Korrekturterm für multiple Reflexionen B 2499
 - 17.6.10.2.2 Konkreter Schirmaufbau 2499
 - 1. Schirmmaterial 2499
 - a) Alle Fernfelder, elektrische und höherfrequente magnetische Nahfelder ($> 10\text{ kHz}$) 2499
 - b) Niederfrequente magnetische Nahfelder ($\leq 10\text{ kHz}$) 2500
 - 2. Abgeschlossenheit des Schirmes 2500
 - 3. Erdung von Schirmen 2500
 - 17.6.10.3 Erdung von Kabelschirmen 2501
 - a) Schirm als Teil des Betriebsstromkreises 2501
 - b) Schirm mit reiner Schirmfunktion 2501
- 17.6.11 Maßnahmen zur Reduktion der Störaussendung von Quellen 2502
- 17.6.12 Allgemeines zur Verbesserung der Störfestigkeit 2503
 - 17.6.12.1 Grundsätzliches 2503
 - 17.6.12.2 Maßnahmen und Gesichtspunkte bei analogen Systemen 2503
 - 17.6.12.3 Maßnahmen und Gesichtspunkte bei digitalen Systemen 2503

- 17.7 EMV-Normung und CE-Kennzeichnung 2504
- 17.7.1 Einführung und Struktur von Normen und Richtlinien 2504
- 17.7.2 Vorgangsweise bei der CE-Kennzeichnung 2506
 - A) CE-Modulverfahren 2507
 - B) Dokumentation und Konformitätserklärung 2508
 - C) Inverkehrbringen 2508
- 17.7.3 Maschinenrichtlinie 2509
- 17.7.4 Niederspannungsrichtlinie 2510
- 17.7.5 EMV-Richtlinie (Ermittlung von Störfestigkeit und Störaussendung durch Prüfungen) 2512
- 17.7.6 CE-Kennzeichnung bei Stromversorgungen 2519
- 17.7.7 CE-Kennzeichnung in der elektrischen Antriebstechnik 2520
- 17.8 Normgerechte Prinzipien zur EMV-Störfestigkeitsmessung 2521
- 17.8.1 Störfestigkeit gegen schnelle elektrische Transienten (Bursts) 2522
- 17.8.2 Störfestigkeit gegen Stoßspannungen (Surges) 2524
- 17.8.3 Störfestigkeit gegen elektrostatische Entladungen (ESD) 2529

17.8.4 Störfestigkeit gegen Hochfrequenzeinstrahlung (AM = Amplitudenmodulation)	2531
17.8.5 Störfestigkeit gegen Hochfrequenzeinstrahlung (PM = Pulsmodulation)	2533
17.8.6 Störfestigkeit gegen HF-Bestromung auf Leitungen	2534
17.8.7 Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen	2534
17.9 Normgerechte Prinzipien zur Störaussendungsmessung	2536
17.9.1 Leitungsgebundene Störaussendungen (150 kHz ... 30 MHz)	2537
17.9.2 Oberschwingungen	2540
17.9.3 Flicker	2543
17.9.4 Strahlungsgebundene Störaussendungen	2543
17.10 Einteilungsgrundsätze der Störungsarten und praktische Hinweise	2549
17.10.1 Einteilung nach technisch-physikalischen Gesichtspunkten	2549
17.10.2 Vergleich der größtenteils genormten Störimpulse und der Netzspannungsbeeinträchtigungen nach Größe und Zeitdauer	2550
17.10.3 Einteilung nach „Ursache und Wirkung“	2552
17.10.4 Praktische Hinweise zur Störungsproblematik der Leistungselektronik	2552
17.10.4.1 Störquellen in Schaltnetzteilen	2552
17.10.4.2 Ansatzpunkte zur EMV-Optimierung	2556
17.10.4.3 Maßnahmen zur Minimierung von Störungen	2556
17.10.4.4 Bauelemente für die Entstörung – Maßnahmen zur nachträglichen Entstörung	2557
17.11 Historische Entwicklung der Funkstörnormen und aktuelle Normwerte	2561
17.11.1 Aktualisierte Werte zu den leitungsgebundenen Störgrenzwerten nach Abschnitt 7.3.3 und historischer Überblick	2561
17.11.2 Aktualisierte Werte zu den Geräusch- und Längsspannungen (ergänzend zu Abschnitt 7.3.2)	2564
17.11.3 Aktualisierte Störgrenzwerte bei Abstrahlung (ergänzend zu Abschnitt 7.3.4)	2564
17.12 Beeinflussung von Nachrichtenleitungen durch Schaltungen der Leistungselektronik – Analytische Berechnung	2566
17.12.1 Allgemeines	2566
17.12.1.1 Motivation zur analytischen EMV-Behandlung	2566
17.12.1.2 Überblick zur praktischen Bedeutung vorliegender Analyse	2566
17.12.2 Prinzipielle Gesichtspunkte zur Berechnung der Starkstrombeeinflussung für Nachrichtenkabel	2567
17.12.2.1 Im Bereich von Drehstromanlagen	2567
17.12.2.1.1 Beeinflussende Leitung	2567
17.12.2.1.2 Beeinflußtes Nachrichtenkabel	2568
17.12.2.2 Im Bereich von elektrischen Bahnen	2568
17.12.2.2.1 Beeinflussende Leitung (Fahrdraht)	2568
17.12.2.2.2 Beeinflußtes Nachrichtenkabel	2569
17.12.3 Grenzwerte für Spannungen bei Beeinflussungen	2570
17.12.3.1 Maximalwerte für Geräusch- und Fremdspannungen	2570
17.12.3.2 Maximalwerte von Gefährdungsspannungen	2570
17.12.4 Berechnungsformel nach VDE	2571
17.12.5 Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters in einem Hohlzylinder aus Stahl	2572
17.12.6 Fluß in der Schleife des Nachrichtensystems	2594
17.12.7 Oberschwingungsgehalt des Speisestromes von thyristorgesteuerten Verbrauchern (Gleichstrommotor-Antrieb) und Gefährdungsspannung	2601
17.12.7.1 Idealisiertes Zeitverhalten	2601
17.12.7.2 Nichtideales Verhalten	2602
17.12.8 Oberschwingungsgehalt und Gefährdungsspannung bei Lastkurzschluß	2603
17.12.8.1 Gleiche Stromformen in allen drei Phasenleitern	2603

17.12.8.2 Ausfall einer Phase	2604
17.12.8.3 Zusammenfassung	2605
17.13 Literatur	2606
Namen- und Sachverzeichnis	2611
Verzeichnis der Tafeln und Tabellen	2785
Anhang 4F. Tabelle zu Abb. 4.60 und 4.62 (Drehstromsteller)	2791
Anhang 5A. Kreisstrommittelwert	2792
5A.1 Gegenparallelschaltung zweier M3-Schaltungen	2792
5A.1.1 Grundlagen	2792
5A.1.2 Beispiel: Berechnung für $\alpha = 30^\circ$ bzw. 18°	2792
5A.1.3 Berechnung für $\alpha = 75^\circ$	2794
5A.1.4 Formel für den Bereich $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	2796
5A.1.5 Formel für $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	2796
5A.1.6 Berechnung für $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	2797
5A.2 Kreuzschaltung zweier M3-Schaltungen	2798
5A.2.1 Allgemeines	2798
5A.2.2 Berechnung für den Bereich $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	2798
5A.2.3 Berechnungen für den Bereich $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	2803
5A.2.4 Berechnung für den Bereich $90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	2806
5A.2.5 Berechnung für den Bereich $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	2806
5A.3 Kreuzschaltung zweier B6-Schaltungen	2807
5A.3.1 Grundlagen	2807
5A.3.2 Berechnung für den Bereich $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	2807
5A.3.3 Berechnung für den Bereich $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	2809
5A.3.4 Berechnung (Formel) für den Bereich $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	2811
5A.3.5 Berechnung (Formel) für den Bereich $90^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	2811
5A.3.6 Berechnung (Formel) für den Bereich $120^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	2812
5A.3.7 Berechnung (Formel) für den Bereich $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	2812
Anhang 11A. Details zu Abb. 11.27	2815
Anhang 12A. Ergänzungen zu Kapitel 12	2818
12A.1 Ergänzung zu S. 1219f.	2818
12A.2 Ergänzung zu S. 1235f.	2818
12A.3 Ergänzung zu S. 1244f.	2818
12A.4 Ergänzung zu S. 1259	2819
12A.5 Ergänzung zu S. 1269	2819
12A.6 Ergänzung zu S. 1270ff.	2820
12A.7 Ergänzung zu S. 1292	2821
Anhang 12B. Simulationen und detaillierte Analysen zu Abschnitt 12.1.	2825
12B.1 Buck-Konverter: MW-Stromregelung im nichtlückenden Betrieb	2825
12B.1.1 Allgemeines	2825
12B.1.2 Blockschaltbild für die Mittelwert-Stromregelung	2826
12B.1.3 Beschreibung der Übertragungsfunktionen	2827
12B.1.3.1 Innerer Regelkreis (Stromregelkreis)	2827
12B.1.3.1.1 Stromregler	2827

12B.1.3.1.2 PWM und Schaltelemente	2827
12B.1.3.1.3 Übertragungsfunktion zwischen Spannung U_e und Strom I_L	2827
12B.1.3.1.4 Innere Regelschleife und Stromregelkreis	2828
12B.1.3.1.5 Geschlossener innerer Regelkreis	2828
12B.1.3.2 Äußerer Regelkreis (Spannungsregelkreis)	2828
12B.1.3.2.1 Blockschaltbild	2828
12B.1.3.2.2 Spannungsregler	2829
12B.1.3.2.3 $R - C$ -Filter	2829
12B.1.3.2.4 Offene Schleife	2829
12B.1.3.2.5 Spannungsregelkreis	2829
12B.1.4 Variation der Parameter	2830
12B.1.5 Simulationsumgebung in Simulink	2830
12B.1.6 Maple-Dokument	2832
12B.1.7 MATLAB/Simulink Simulationsprogramme	2834
12B.1.8 Simulationsresultate und weitere Analysen	2864
12B.1.8.1 Offener Stromregelkreis	2864
12B.1.8.2 Geschlossener Stromregelkreis	2866
12B.1.8.3 Sprungantwort des geschlossenen Stromregelkreises	2868
12B.1.8.4 Bodediagramme für F_{U_o} für den Spannungsregelkreis mit Knick- zugverläufen	2868
12B.1.8.4.1 Bodediagramme für Fälle 1 und 1a	2868
12B.1.8.4.2 Bodediagramme für Fälle 2 und 2a	2872
12B.1.8.4.3 Bodediagramme für Fall 3	2875
12B.1.8.5 Bodediagramme der Übertragungsfunktionen F_{U_w} der geschlos- senen Spannungsregelkreise	2877
12B.1.8.6 Sprungantworten der geschlossenen Spannungsregelkreise (von F_{U_w}) für einen Führungsgrößensprung von 24 V auf 26 V	2879
12B.1.8.7 Sprungantworten der geschlossenen Spannungsregelkreise (von F_{U_w}) für einen Lastsprung	2880
12B.1.9 Systemumschaltung	2881
12B.1.9.1 Änderung des Lastwiderstandes R_{La} – Erläuterung zur Systeme- umschaltung	2881
12B.1.9.1.1 Darstellung in Simulink	2881
12B.1.9.1.2 Zustandsraumdarstellung	2882
12B.1.9.1.3 Veranschaulichung der Systemumschaltung (Änderung des Last- widerstandes)	2882
12B.2 Untersuchung der Unterschiede bei Verwendung von PI- bzw. PT ₁ -Reglern bei SW-Stromregelung im nichtlückenden Betrieb	2883

Anhang 12C. Buck-Konverter: MW-Stromregelung im lückenden Betrieb 2902

12C.1 Grenze zum lückenden Betrieb	2902
12C.2 Übersetzungsverhältnis	2903
12C.3 Übertragungsfunktionen	2904
12C.3.1 PI - Spannungsregler	2904
12C.3.2 PI - Stromregler	2905
12C.3.3 PWM	2905
12C.3.4 Filter 1	2905
12C.3.5 Filter 2	2905
12C.4 Anwendung für Tafel 12.1	2905
12C.5 Modellierung und Regelung eines Buck-Konverters im Lückbetrieb	2906
12C.5.1 Buck-Konverter Prinzipschaltbild	2906
12C.5.2 Modellierung	2907

12C.5.2.1 Differentialgleichungssystem	2907
12C.5.2.2 Zustandsraumdarstellung	2909
12C.5.2.3 Übertragungsfunktionen	2913
12C.5.3 Regelung	2914
12C.5.3.1 Direct Duty-Cycle Control (DDC) bei Lückbetrieb, Prinzipschalt- bild	2914
12C.5.3.2 Reglerentwurf	2914
12C.5.3.3 Bode-Diagramme	2916
12C.5.4 Simulationsergebnisse	2917
12C.5.4.1 Simulink-Modell	2917
12C.5.4.2 Sprungantworten, makroskopisch	2918
12C.5.4.3 Vollständiges Simulink-/SimScape-Modell	2919
12C.5.4.4 Sprungantworten, mikroskopisch	2920
12C.6 Literatur	2920
Anhang 12D. Boost-Konverter: SW-Stromregelung im lückenden Betrieb	2922
12D.1 Prinzipieller Aufbau, Blockschaltbild	2922
12D.2 Ausgangsfilter $F_2(s)$	2923
12D.3 Lückbetrieb, kritischer Bereich	2923
12D.3.1 Berechnung analog zu Tabelle 12.1	2924
12D.4 Literatur	2927
Anhang 12E. Nachbetrachtung zu Regelungen und Übertragungsfunktionen	2929
12E.1 Vergleich von Näherungsmethoden	2929
12E.2 Tafel zu den Übertragungsfunktionen	2930
Anhang 13A. Verlustlose Turn-On- und Turn-Off- (Snubber-)Netzwerke	2933
13A.1 Einleitung	2933
13A.2 Anforderungen an ideale Turn-On- und Turn-Off-Snubber	2934
13A.3 Realisierung	2934
13A.3.1 Aufbau des Inverters	2934
13A.3.2 Turn-Off-Snubber	2935
13A.3.3 Turn-On-Snubber sowie Energiebetrachtung für den Turn-Off-Vorgang	2942
13A.4 Diskussion der Ergebnisse	2949
13A.5 Schlußfolgerungen	2950
13A.6 Weitere Details zu den Schaltkreisen	2951
13A.7 Ableitung der Gln. (13A.1)...(13A.3) sowie Details zu Abb. 13A.8	2958
13A.7.1 Ableitung von Gl. (13A.1), Energielieferung in die Tiefsetzsteller- Eingangskondensatoren $C_{R_2} \parallel C_{L_2}$ zur Energierückspeisung in den DC- Zwischenkreis	2958
13A.7.2 Ableitung von Gl. (13A.2), Energielieferung an $C_{R_1} \parallel C_{L_1}$ beim Aus- schalten von T_1 ohne Berücksichtigung von C_{A_1} und D_{A_1}	2961
13A.7.3 Ableitung von Gl. (13A.3), Energielieferung an $C_{R_1} \parallel C_{L_1}$ beim Aus- schalten von T_1 unter Berücksichtigung von C_{A_1} und D_{A_1}	2964
13A.7.4 Details zu Abb. 13A.8	2969
13A.8 Literatur	2970
Anhang 13B. u-Z-Diagramm	2971
13B.1 Beispiel 1: Serien- bzw. Parallelschwingkreis ohne Schalthandlungen und ohne zusätzliche Energiequellen	2975
13B.2 Beispiel 2: Schwingkreis ähnlich zu Abb. 13B.3, aber mit Schalter	2976

13B.3 Beispiel 3: Serienschwingkreis (wie 2. Beispiel), aber mit zusätzlicher Gleichspannungsquelle	2977
13B.4 Beispiel 4: Serienschwingkreis wie in Abb. 13B.6, aber mit impulsartigem Schließen und Öffnen des Schalters	2979
13B.5 Beispiel 5: Sinusförmige Spannungsquelle an Serienschwingkreis	2980
13B.6 Beispiel 6: Spannungsquelle an Parallelschwingkreis	2981
13B.7 Beispiel 7: Parallelschwingkreis mit Dämpfung	2984
13B.8 Beispiel 8: Serienschaltung mit Dämpfung	2986
13B.9 Beispiel 9: u - Z_i -Diagramm bei geschalteten Strukturen	2989
13B.10 Beispiel 10: Transistor als Impulsstromquelle	2997
13B.11 Beispiel 11: Berücksichtigung von Kennlinien aktiver Bauelemente	3004
13B.12 Beispiel 12: Rückkopplung	3006
13B.13 Beispiel 13: QR-ZCS (Quasi Resonant Zero Current Switching) für Buck-Konverter	3018
13B.14 Beispiel 14: QR-ZVS (Quasi Resonant Zero Voltage Switching) für Buck-Konverter	3023
13B.15 Beispiel 15: SEPIC mit QR-ZCS	3029
13B.16 Beispiel 16: SEPIC mit QR-ZVS	3035
13B.17 Beispiel 17: Zeta-Konverter	3042