

Taschenbuch Elektrotechnik

Band 3/I Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik

Passive Bauelemente · Halbleiter-
bauelemente · Integrierte Schaltungen
Röhren · Leitungen · Antennen · Verstärker
Mischer · Modulatoren · Schallwandler
Analog-Digital- und Digital-Analog-
Umsetzer · Digitale Elementarbausteine
Mikroprozessoren · Speicherbausteine
Fertigungstechnologien · Vakuumtechnik



Taschenbuch Elektrotechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. sc. techn. Dr. techn. h. c. Eugen Philippow
Technische Hochschule Ilmenau

- Band 1
Allgemeine Grundlagen
- Band 2
Grundlagen der Informationstechnik
- Band 3
Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik
- Band 4
Systeme der Informationstechnik
- Band 5
Elemente und Baugruppen der Elektroenergiertechnik
- Band 6
Systeme der Elektroenergiertechnik

Taschenbuch Elektrotechnik

Herausgegeben von
Prof. Dr. sc. techn. Dr. techn. h. c. Eugen Philippow

Band 3 Bauelemente und Bausteine der Informationstechnik

Teil I

3., stark bearbeitete Auflage



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

2 Bauelemente der Informationstechnik 216

2.1 Passive Bauelemente der Niederfrequenz- und Hochfrequenztechnik 216

2.1.1 Widerstände 216
 von *Kurt Biebach*

2.1.1.1 Grundlagen 216
 Definition und Berechnung des Widerstandes – Widerstand räumlicher Leiter – Widerstand „dünner“ und „dicker“ Schichten – Flächenwiderstand – Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes – Nichtlinearität – Rauschen

2.1.1.2 Festwiderstände 222
 Widerstandswert und Toleranz – Nennverlustleistung – Lastminderung (Derating) – Grenzspannung – Temperaturkoeffizient – Stabilitätsklasse – Nomenklatur der Festwiderstände nach IEC 115 – Klassifizierung der Festwiderstände nach Material und Technologie

2.1.1.3 Mechanisch veränderbare Widerstände 237
 Terminologie – Kenngrößen veränderbarer Widerstände – Typische technische Ausführungsformen

2.1.1.4 Temperaturabhängige Festwiderstände (Thermistoren) 240
 Heißleiter – Kaltleiter

2.1.1.5 Spannungsabhängige Festwiderstände (Varistoren) 242

2.1.2 Kondensatoren 243
 von *Hans-Dieter Langer*

2.1.2.1 Grundlagen der Bauelementfunktion 243
 Definition und Berechnung der Kapazität – Theoretische Beschreibung von Kondensatoren – Dielektrikum

2.1.2.2 Grundaufbau und Grundtechnologien von Kondensatoren 254

2.1.2.3 Hauptkennwerte von Kondensatoren 257

2.1.2.4 Anwendung von Kondensatoren 261
 Schaltzeichen

2.1.3 Induktivitäten und Gegeninduktivitäten 271
 von *Detlev Roseburg*

2.1.3.1 Allgemeines 271
 Definition und Einheit – Grundbegriffe – Eigenschaften technischer Induktivitäten

2.1.3.2 Spulen und Drosseln 275
 Luftspulen – Spulen mit Magnetkern – Drosseln

2.1.3.3 Übertrager und Kleintransformatoren 281
 Kleinsignalübertrager – Großsignalübertrager – Netz-Kleintransformatoren

2.2 Passive Bauelemente der Höchstfrequenztechnik 286
 von *Manfred Kummer* und *Heinrich Loele*

2.2.1 Charakteristische Besonderheiten 286

2.2.2 Wellenleiter 286

2.2.2.1 Allgemeine Eigenschaften 286
 Feldtypen – Wellentypen

2.2.2.2 Hohlleitungen 287
 Feldverteilungen – Ausbreitungskenngrößen – Grenzwellenlänge und Grenzfrequenz – Grundwellentypen – Feldwellenwiderstand – Wandstromdichten – Leistungstransport – Verlustdämpfung – Rechteckhohlleiter mit H_{10} -Welle

2.2.2.3 Streifenleitungen 292
 Mikrostreifenleitung (microstrip)

212 *Inhalt*

2.3.2.3 Z-Diode 332

2.3.2.4 Varaktordiode 332

2.3.2.5 Tunneldiode 332

2.3.2.6 Rückwärtsdiode 333

2.3.2.7 Heterodiode 334

2.3.2.8 Schottkydiode 334

2.3.2.9 Piezodiode 334

2.3.2.10 PIN-Diode 334

2.3.2.11 Lawinenlaufzeitdiode (Impattdiode) 336

2.3.2.12 Bipolartransistoren 338
 Funktionsprinzip und Ausführungsformen – Strom-Spannungs-Kennlinien – Lineare Verstärkereigenschaften (Kleinsignalverhalten) – Schaltereigenschaften – Thermisches Verhalten – Rauschen – Fadentransistor, Doppelbasisdiode

2.3.2.13 Thyristoren 345
 Aufbau und prinzipielle Wirkungsweise – Elektrische Eigenschaften – Triac – Diac – Timistor

2.3.2.14 Sperrschichtfeldeffektbauelemente 349
 Sperrschichtfeldeffekttransistor – Feldeffektvaristor – Schottkykolektortransistor – Metall-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MESFET)

2.3.3 Oberflächengesteuerte Bauelemente 352

2.3.3.1 MIS-Kapazität 352

2.3.3.2 MIS-Feldeffekttransistoren 353
 Funktionsprinzip und technische Ausführungsformen – Strom-Spannungs-Kennlinien – Lineare Verstärkereigenschaften – Sondereffekte – Schaltereigenschaften

2.3.3.3 Speicherfeldeffekttransistoren 356
 FEFET – MNOSFET – FAMOST/SAMOST – MASFET

2.3.3.4 Ladungsgekoppelte Bauelemente (CCD-Elemente) 357

2.3.3.5 MIS-Leistungstransistoren 358

2.4 Optoelektronische Halbleiterbauelemente 358
 von *Karl-Heinz Arnold*

2.4.1 Definition und Begriffe 358

2.4.2 Strahlungssender 359

2.4.2.1 Elektrolumineszenzbauelemente 360

2.4.2.2 Plasmaanzeigebauelemente 360

2.4.2.3 Lumineszenzdioden 361

2.4.2.4 Halbleiterlaser 362

2.4.2.5 Anzeigeelemente mit LED-Strukturen 363

2.4.2.6 Flüssigkristallanzeigeelemente (LCD-Displays) 364

2.4.3 Strahlungsempfänger 364

2.4.3.1 Fotowiderstand 365

2.4.3.2 Fotoelement 366

2.4.3.3 Fotodiode 366

2.4.3.4 Fototransistor 367

2.4.3.5 Fotothyristor 368

2.4.3.6 Integrierte fotoempfindliche Strukturen 369

2.4.4 Optoelektronische Koppellemente 369

2.5 Supraleitende elektronische Bauelemente 371
 von *Dieter Engelage*

2.5.1 Spezielle physikalische Erscheinungen bei tiefen Temperaturen 371

2.5.1.1 Widerstandsverhalten bei tiefen Temperaturen 371

2.5.1.2 Meißner-Ochsenfeld-Effekt 371

2.2.2.4 Weitere Planarleitungen 294

2.2.2.5 Dielektrische Leitungen 295

2.2.2.6 Weitere Leitungsformen 296
 Koaxialleitung mit Hohlleiterwellen – Radialleitung – Periodisch inhomogene Wellenleiter

2.2.3 Wellenleiterbauelemente 298

2.2.3.1 Reflexionsfreie Wellenleiterabschlüsse 298

2.2.3.2 Reaktanzleitungen 299

2.2.3.3 Verbindungselemente 300
 Koaxialstecker-Buchse-Verbindung – Hohlleiter-Kontaktflansch – Hohlleiter-Drossel-flansch

2.2.3.4 Ankopplungen, Übergänge, Wellentypwandler 301

2.2.3.5 Leitungsdiskontinuitäten 302

2.2.3.6 Dämpfungsglieder und Phasenschieber 303

2.2.3.7 Polarisationsdreher und Polarisationswandler 305

2.2.3.8 Frequenzfilter und Frequenzweichen 305

2.2.3.9 Dreitorverzweigungen 306

2.2.3.10 Viertorverzweigungen 306
 Ringhybrid – Doppel-T-Verzweigungen (magisches T)

2.2.3.11 Richtkoppler 307
 Langschlitz- und Mehrlochkoppler – Streifenleitungskoppler

2.2.4 Ferritbauelemente 309

2.2.4.1 Richtungsleitungen 310
 Faradayrichtungsleitung – Faradayeffekt – Resonanzrichtungsleitung – Feldverschiebungs-richtungsleitung – Kantenwellenrichtungsleitung

2.2.4.2 Zirkulatoren 312

2.2.5 Resonatoren 314

2.2.5.1 Leitungsresonatoren 315

2.2.5.2 Topfkreise 315

2.2.5.3 Hohlraumresonatoren 316

2.2.5.4 Dielektrische Resonatoren 317

2.2.5.5 Spiegelresonatoren 317

2.2.5.6 Magnetostatische Resonatoren 318

2.3 Halbleiterbauelemente 319
 von *Albrecht Möschwitzer*

2.3.1 Volumeneffektbauelemente 320

2.3.1.1 Dielektrische Dioden 320
 Eintrajektorinjektionsdiode – Doppelinjektionsdiode – Lawineninjektionsdiode

2.3.1.2 Gunneffektbauelemente 321
 Gunneffekthalbleiter – Negative differentielle Leitfähigkeit und Raumladungsinstabilitäten – Kleinsignalverhalten – Großsignalverhalten (Domäindynamik) – Steuerung der Frequenz – LSA-Modus – Kleinsignalverstärkung durch parametrische Effekte beim Domäinendurchlauf – Herstellung und Anwendungen

2.3.1.3 Schalter- und Speicherelemente aus amorphen Halbleitern 325

2.3.1.4 Thermoelektrische Bauelemente 326
 Thermistor – Thermoelement

2.3.1.5 Galvanomagnetische Bauelemente 327
 Hallelement – Feldplatte

2.3.1.6 Piezoelektrische Bauelemente 328
 Piezoelektrische Wandler – Piezoresistive Wandler (Halbleiterdehnmeßstreifen)

2.3.2 Sperrschichtbauelemente 329

2.3.2.1 Richt- und Universaldioden 329

2.3.2.2 Schaltioden 331

Inhalt 213

2.5.1.3 Supraleitende Ringströme 372

2.5.1.4 Stromverzweigung in supraleitenden elektronischen Schaltungen 372

2.5.1.5 Elektronentunnelung in supraleitenden dünnen Schichten 372

2.5.2 Supraleitende dünne Schichten 373

2.5.2.1 Hypothesen des Phasenübergangs Supraleitung-Normalleitung 373

2.5.2.2 Eigenschaften des Phasenübergangs 373

2.5.3 Supraleitende Dünnschichtbauelemente 374

2.5.3.1 Bandleitungen 374

2.5.3.2 Kryotrons 374
 Drahtkryotron – Kreuzkryotron – Parallelkryotron

2.5.3.3 Ryotron und Kryaktor 375

2.5.3.4 Supraleitende Tunnellelemente 376
 Bauelemente mit normalem Tunnelübergang – Josephson-Gleichstromtunnellelemente

2.5.3.5 Supraleitende Schichtspeicherelemente 378
 Schichtspeicherelement – Brückenspeicherelement – Crowe-Speicherelement

2.5.4 Digitale supraleitende Schaltungen 379

2.5.4.1 Besonderheiten supraleitender Schaltungen 379

2.5.4.2 Ausgewählte Schaltungen 380
 Kryotronzelschaltung – Grundschaltung mit zwei Kryotrons – Kollektorstrom angesteuerte Kryotronzelschaltung – Tunnelkryotronzelschaltungen – SQUID-Schaltungen

2.5.5 Prinzip der Kryolanlage für supraleitende Dünnschichtelektronik 381

2.6 Vakuumelektronische Bauelemente 382
 von *Joachim Fisch* und *Horst Göllnitz*

2.6.1 Elektronenquellen und ihre Anwendung in Katoden 383

2.6.1.1 Physikalische Effekte bei der Elektronenemission ins Vakuum 384
 Katodennapfenenergiemodell – Herabsetzung der Austrittsarbeit – Strombestimmung aufgrund der Katodennapfenenergiemodellvorstellungen

2.6.1.2 Katodenarten vakuumelektronischer Bauelemente 388
 Thermische Katoden – Kaltkatoden – Sekundäremissionskatoden – Fotokatoden

2.6.2 Dichtegesteuerte vakuumelektronische Bauelemente 394

2.6.2.1 Physikalische Effekte in dichtegesteuerten vakuumelektronischen Bauelementen 394
 Potentialfeld des Gitters – Triodenkenngrößen – Wirkraumtrennung mit Hilfe von Gittern – Gitterströme

2.6.2.2 Dichtegesteuerte Elektronenröhren 397
 Entladungssysteme geringer Perveanz – Radiofrequenzsenderöhren – Dichtegesteuerte Mikrowellenröhren – Thermionischer Konverter

2.6.3 Laufzeitröhren 402

2.6.3.1 Physikalische Effekte in Laufzeitröhren 402

2.6.3.2 Anwendungen der Effekte in den wichtigsten Laufzeitröhren 404
 Zweikammerklystron einschließlich Sonderformen – Mehrkammerklystron – Gyrotron – Wanderfeldröhre – Rückwärtswellenröhre (Karzinotron) – Gyrocon – Magnetron

2.6.4 Katodenstrahlröhren 407

2.6.4.1 Physikalische Effekte in Katodenstrahlröhren 407
 Strahlerzeugung – Elektronenoptische Grundlagen für niederperveante Strahlerzeugungssysteme – Strahlablenkung – Auftreffen der Strahllektronen

2.6.4.2 Bauelemente zur Erzeugung unzerlegter Bilder 410

2.6.4.3 Bauelemente zur Erzeugung von Kurvenzugbildern 411
 Oziloskopröhren – Radarröhren (Polarkoordinatenröhren) – Sichtspeicherröhren – Signal-speicherröhren – EBS-Schalter- und Verstärkeröhren

2.6.4.4 Bauelemente zur Erzeugung zeilengeschriebener Bilder 413
 Bildwiedergaberöhren für Schwarzweißfernsehen – Bildwiedergaberöhren für Großraumprojektion – Bildwiedergaberöhren für Farbfernsehen – Bildaufnahmeröhren

214	<i>Inhalt</i>	<i>Inhalt</i>	215
2.6.4.5	Elektronenstrahl als Werkzeug zur Herstellung mikroelektronischer Strukturen		419
2.6.5	Gasentladungsröhren		419
2.6.5.1	Physikalische Effekte in Gasentladungsröhren		419
2.6.5.2	Kaltkathoden-Gasentladungsröhren Glimmlampen – Stabilisatorröhren – Ziffer- und Zeichenanzeigebaulemente – Nullodden (Sperrröhren)		422
2.6.5.3	Fremdgeheizte Glühkathoden-Gasentladungsröhren Thyratrons – Gasentladungsrauschkioden		424
2.6.6	Schutzrohrkontakte		425
2.7	Metallische Leitungen und Lichtwellenleiter von <i>Martin Janke</i> und <i>Hans-Günther Prenzlow</i>		426
2.7.1	Grundeigenschaften metallischer Leitungen		426
2.7.1.1	Kenngrößen symmetrischer Leitungen Widerstandsbelag – Induktivitätsbelag – Kapazitätsbelag (Betriebskapazität) – Ableitungsbelag (Betriebsableitung)		427
2.7.1.2	Kenngrößen koaxialer Leitungen Widerstandsbelag – Induktivitätsbelag – Kapazitätsbelag – Ableitungsbelag		430
2.7.1.3	Wellenwiderstand und Ausbreitungskoeffizient metallischer Leitungen		431
2.7.2	Technische Anwendung metallischer Leitungen		432
2.7.2.1	Symmetrische Kabel Unbespulte Kabel – Bespulte Kabel (Pupinkabel) – NF-, TF- und PCM-Kabel – HF-Empfangskabel		432
2.7.2.2	Koaxialkabel TF- und PCM-Kabel – HF-Kabel		435
2.7.3	Temperaturkoeffizienten metallischer Leitungen		437
2.7.4	Nebensprechen zwischen metallischen Leitungen Nebensprechgrundwert – Nahnebensprechen – Fernnebensprechen		438
2.7.4.1	Nebensprechen auf symmetrischen Leitungen Nebensprechen im nichtstationären Fall		438
2.7.4.2	Nebensprechen auf koaxialen Leitungen Kopplungswiderstand – Nahnebensprechen – Fernnebensprechen		440
2.7.5	Kopplungsausgleich		442
2.7.5.1	Ausgleichbarkeit von Kopplungen Nahnebensprechkopplung – Fernnebensprechkopplung		442
2.7.5.2	Konzentrierter Ausgleich		444
2.7.5.3	Ausgleich des Pupinfeldes		445
2.7.5.4	Kreuzungsausgleich		445
2.7.6	Fremdstrombeeinflussung		445
2.7.6.1	Reduktionsfaktor Mittel zur Verkleinerung des Reduktionsfaktors – Parallelleiter, Blitzschutzseil – Kompensationstransformatoren – Saugtransformatoren – Erdungspunkte		445
2.7.6.2	Mantelkopplungswiderstand, Unsymmetriegrad		447
2.7.7	Lichtwellenleiter		448
2.7.7.1	Aufbau und Arten		448
2.7.7.2	Numerische Apertur, Dämpfung, Dispersion		449
2.7.8	Technische Anwendung von Lichtwellenleitern		452
2.7.8.1	Lichtwellenleiterkabel		452
2.7.8.2	Spleiße und Stecker		453
2.7.8.3	Kurzstrecken- und Weistreckenübertragung		454
2.7.9	Kabeldaten		455
2.8	Antennen von <i>Rudolf Kübart</i>		461
2.8.1	Begriffe der Antennentheorie		461
2.8.1.1	Richtcharakteristik, Richtdiagramm		462
2.8.1.2	Strahlungsleistung		462
2.8.1.3	Antennengewinn		463
2.8.1.4	Strahlungswiderstände		464
2.8.1.5	Strahlungswirkungsgrad		465
2.8.1.6	Wirksame Antennenlänge		465
2.8.1.7	Antennenwirkfläche und Antennenstreufläche		465
2.8.2	Reziprozitätsgesetz, Sende- und Empfangsantenne		466
2.8.3	Modellmessungen von Antennen		466
2.8.4	Hertzscher Dipol		467
2.8.5	Magnetischer Dipol, Babinetsches Prinzip		468
2.8.6	Antennengruppen		469
2.8.6.1	Begriffe		469
2.8.6.2	Lineare Gruppen Querstrahler – Längsstrahler – Antennen über ideal leitfähiger Ebene, Spiegelungsfaktor – Lineare Gruppen mit ungleicher Amplitudenverteilung der Ströme, Diagrammsynthese		469
2.8.6.3	Ebene und räumliche Gruppen		476
2.8.6.4	Kreisgruppen		477
2.8.6.5	Phasengesteuerte Gruppen		478
2.8.7	Linearantennen		478
2.8.7.1	Stromverteilung		478
2.8.7.2	Antennen mit fortschreitender Welle		479
2.8.7.3	Antennen mit stehender Welle Einfache Leitungstheorie, Sehr dünne Antennen – Einfluß des endlichen Durchmessers von Linearantennen – Felddipole		481
2.8.8	Breitbandantennen		484
2.8.8.1	Dipolartige Breitbandantennen		484
2.8.8.2	Extrem breitbandige Antennen Gleichwinkelantennen – Selbstkomplementäre Strukturen – Logarithmisch-periodische Systeme		484
2.8.9	Flächenantennen		486
2.8.9.1	Berechnungsgrundlagen		486
2.8.9.2	Hohlleiterantennen		487
2.8.9.3	Phasenkorrigierende Systeme Linsen – Spiegelantennen		487
2.8.9.4	Oberflächenwellenantennen Dielektrische Antennen – Wendelantennen		489
2.9	Elektromechanische Bauelemente von <i>Eberhard Kallenbach</i> und <i>Siegfried Lusche</i>		490
2.9.1	Besonderheiten elektromechanischer Bauelemente der Informationstechnik		490
216	<i>2.1 Passive Bauelemente der Niederfrequenz- und Hochfrequenztechnik</i>		
2.9.2	Magnetostruktive und piezoelektrische Antriebselemente		492
2.9.2.1	Magnetostruktive Antriebselemente		492
2.9.2.2	Piezoelektrische Antriebselemente		492
2.9.3	Elektromagnetomechanische Antriebselemente		494
2.9.3.1	Kleinmagnete mit neutralem und polarisiertem Magnetkreis		494
2.9.3.2	Elektromagnetische Schrittmotoren		495
2.9.4	Elektrodynamische Antriebselemente		497
2.9.5	Mehrkoordinatenantriebssysteme		500
2.9.6	Elektromechanische Relais		500
2.9.6.1	Übersicht		500
2.9.6.2	Aufbau elektromagnetischer Relais		503
2.9.6.3	Schaltverhalten		505
2.9.6.4	Relaiskennwerte Kennwerte des Triebsystems – Kennwerte des Kontaktsystems – Sonstige Kennwerte		506
2.9.6.5	Zuverlässigkeit Prüfzuverlässigkeit – Betriebszuverlässigkeit		507
2.9.6.6	Polarisierte Relais		508
2.9.6.7	Entwicklungstendenzen		509
	Literatur		509

Autoren

- Arnold, Karl-Heinz*, Dr. rer. nat., VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin im VEB Kombinat Mikroelektronik (Abschn.2.4)
- Beuthner, Jürgen*, Dipl.-Ing., VEB Zentrum Wissenschaft und Technik im Kombinat Rundfunk und Fernsehen, Dresden (Abschn.4.1.6)
- Biebach, Kurt*, Dr.-Ing., VEB Kombinat Elektronische Bauelemente, Teltow (Abschn.2.1.1)
- Burkhardt, Winfrid*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.1.1, zus. mit *W. Kienast*)
- Engelage, Dieter*, Prof. Dr. sc. techn., Ingenieurhochschule Berlin (Abschn.2.5)
- Fengler, Wolfgang*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.5.4, zus. mit *M. Roth*)
- Fisch, Joachim*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.6, zus. mit *H. Göllnitz*)
- Fredrich, Wolfgang*, Doz. Dr. sc. techn., Wilhelm-Pieck-Universität Rostock (Abschn.1.2.1.2 bis 1.2.2)
- Freiburger, Georg*, Dr.-Ing., VEB Zentrum Wissenschaft und Technik im Kombinat Rundfunk und Fernsehen, Dresden (Abschn.1.4.1.4–1.4.1.12, zus. mit *G. Rösel*)
- Fuchs, Günter*, Doz. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.1.1.3, 4.1.3.4, 4.1.5)
- Geidel, Klaus-Dieter*, Dr.-Ing. †, Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.5.3, zus. mit *M. Roth*)
- Göllnitz, Horst*, Doz. Dr.-Ing. habil., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.6, zus. mit *J. Fisch*)
- Hirt, Norbert*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.3.3, zus. mit *M. Roth*)
- Janke, Martin*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.7, zus. mit *H.-G. Prenzl*)
- Kallenbach, Eberhard*, Prof. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.9.1 bis 2.9.5)
- Kienast, Woldemar*, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.1.1, zus. mit *W. Burkhardt*)
- Köhler, Eberhart*, Prof. Dr.-Ing. habil., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.3.1–3.4)
- Kohlschmidt, Rainer*, Prof. Dr. sc. techn., Ingenieurhochschule für Seefahrt, Warnemünde/Wustrow (Abschn.4.1, 4.1.3.1–4.1.3.3, 4.1.4.1, 4.1.4.4, 4.1.4.5)
- Kübart, Rudolf*, Dr.-Ing., Technische Universität Dresden (Abschn.2.8)
- Kummer, Manfred*, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.2.1–2.2.3)
- Langer, Hans-Dieter*, Doz. Dr. sc. nat., Technische Universität Karl-Marx-Stadt (Abschn.2.1.2)
- Loele, Heinrich*, Doz. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.2.2.4–2.2.5)
- Lusche, Siegfried*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau und VEB Relais-technik Großbreitenbach (Abschn.2.9.6)
- Mau, Volkert-Friedrich*, Dr.-Ing., Kombinat Elektrogerätewerk Suhl (Abschn.1.4.1)
- Möschwitzer, Albrecht*, Prof. Dr.-Ing. habil., Technische Universität Dresden (Abschn.2.3)
- Müller, Bernhard*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.1.3)
- Orth, Dietrich*, Ing., Rundfunk- und Fernstehtechnisches Zentralamt der Deutschen Post, Berlin (Abschn.4.1.8, zus. mit *N. Schneider* und *G. Schroth*)
- Philippow, Ilka*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.5.5, zus. mit *M. Roth*)
- Prenzl, Hans-Günther*, Dr.-Ing., Institut für Post- und Fernmeldewesen, Berlin (Abschn.2.7, zus. mit *M. Janke*)
- Rehn, Alois*, Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.1.1.1–4.1.1.2)
- Rhein, Dietrich*, Prof. Dr. sc. techn., Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“, Dresden (Abschn.5.2)
- Roche, Gunter*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.5.1, zus. mit *M. Roth*)
- Roseburg, Detlev*, Doz. Dr. sc. techn., Technische Universität Dresden (Abschn.2.1.3)
- Rösel, Günter*, Prof. Dr. sc. techn., VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“, Dresden (Abschn.4.1.1.4–4.1.1.12, zus. mit *G. Freiburger*)
- Roth, Michael*, Prof. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.2, zus. mit *V. Sauer*; 4.3.3, zus. mit *N. Hirt*; 5.1, zus. mit *G. Roche*; 5.3, zus. mit *K.-D. Geidel*; 5.4, zus. mit *W. Fengler*; 5.5, zus. mit *I. Philippow*)
- Rudolph, Hans*, Dr.-Ing., Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der Akademie der Wissenschaften der DDR, Dresden (Abschn.4.3.1–4.3.2)
- Sauer, Veronika*, Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.2, zus. mit *M. Roth*)
- Scarbata, Gerd*, Prof. Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.3.5)
- Schade, Klaus*, Prof. Dr. sc. techn., Technische Universität Dresden (Abschn.1.5)
- Schneider, Norbert*, Dipl.-Ing., Rundfunk- und Fernstehtechnisches Zentralamt der Deutschen Post, Berlin (Abschn.4.1.8, zus. mit *D. Orth* und *G. Schroth*)
- Schroth, Gottfried*, Dr.-Ing., Technische Universität Dresden (Abschn.4.1.8, zus. mit *D. Orth* und *N. Schneider*)
- Seidel, Volkmar*, Dr. sc. techn., VEB RFT Kombinat Nachrichtenelektronik, Leipzig (Abschnitt 4.1.2, 4.1.9)
- Siakkou, Manfred*, Doz. Dr. sc. techn., VEB Magnetbandfabrik Dessau (Abschn.4.1.7)
- Thomass, Harald*, Doz. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.4.1.4.2, 4.1.4.3)
- Thust, Heiko*, Dr. sc. techn., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.1.2.3, 1.4.2)
- Winkler, Gert*, Doz. Dr.-Ing., Technische Hochschule Ilmenau (Abschn.1.2.1.1)

Bei typischen technischen Bauelementen auf der Basis von gesintertem ferroelektrischem polykristallinem Halbleitermaterial (Bariumtitanat als Grundsubstanz) hat die Widerstandsänderung den Charakter einer Sprungfunktion (*PTC-S-Thermistor*).

Die *Widerstands-Temperatur-Charakteristik* von PTC-S-Thermistoren zeigt **Bild 2.18**. Dargestellt ist der Logarithmus des unbelasteten Widerstandes (zero-power resistance) in Abhängigkeit von der Temperatur (linear). Im Gegensatz zu NTC-Thermistoren läßt sich die gesamte Kennlinie nicht durch eine einfache Funktion annähern. Ihr Verlauf wird verursacht durch das Zusammenwirken des halbleitenden Effektes der Titanatkeramik mit negativem TK und des Widerstandes von Potentialbarrieren an den Kristallitgrenzen, deren Ausbildung sehr stark von der Temperatur abhängt.

Im Bereich niedriger Temperaturen bis zu einem Widerstandsminimum verhält sich der PTC-Thermistor wie ein ohmscher Widerstand mit schwach negativem TK. Nach einem Übergangsbereich überwiegt der Widerstand der Potentialbarrieren, und der Widerstand steigt mit der Temperatur exponentiell um 3 ... 4 Zehnerpotenzen an, ehe die Ladungsträgerzunahme den Anstieg abschwächt. Bei weiterer Temperaturerhöhung (Größenordnung 200 K) kommt es zu einem Umschlag im Heißleiterverhalten und zur thermischen Zerstörung des Bauelements.

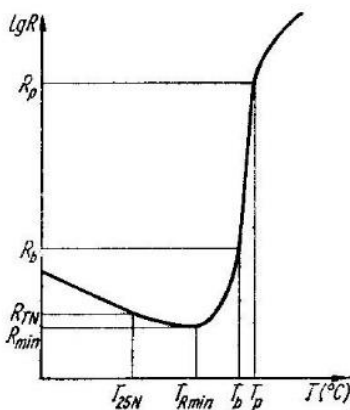


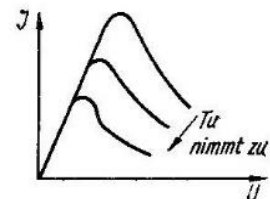
Bild 2.18

PTC-S-Thermistoren. Widerstands-Temperatur-Kennlinie

R_{TN} Nennwiderstand bei T_N ; R_{min} Widerstandsminimum bei T_{Rmin} ; T_b Bezugstemperatur für den Beginn des steilen Widerstandsanstiegs; R_b Bezugswiderstand; T_p Endtemperatur des steilen Widerstandsanstiegs; R_p garantierter Mindestwert des steilen Anstiegs (Bezeichnungen nach IEC 738-1)

Bild 2.19

PTC-S-Thermistoren. Strom-Spannungs-Kennlinie



Als *Nennwiderstand* wird in der Regel der Widerstand des unbelasteten Bauelements bei 25°C festgelegt. In typischen Fällen liegt dieser Widerstand auf dem fallenden Ast der Kennlinie, so daß bei Erhöhung der Temperatur ein Minimum durchlaufen wird (R_{min}). Von einer oberhalb des Minimums liegenden Temperatur T_b (Bezugstemperatur, Sprungtemperatur) beginnt der steile Anstieg des Widerstandes. Der zugehörige Widerstand R_b wird entweder absolut angegeben oder unter Bezugnahme auf den minimalen Widerstand (z. B. $R_b = 2 R_{min}$). Das Ende dieses eigentlichen Arbeitsbereiches wird durch den Punkt (R_p, T_p) der Kennlinie festgelegt, bis zu dem der Widerstandsverlauf bei halblogarithmischer Darstellung annähernd durch eine Gerade dargestellt werden kann (Sekante durch R_b, T_b und R_p, T_p). Für diesen Bereich gilt dann

$$\lg(R/R_b) = \alpha_R (T - T_b); \quad \alpha_R = \frac{1}{\lg e} \lg \frac{R_p}{R_b} \frac{1}{T_p - T_b}.$$

Abhängig vom Widerstand liegt α_R in der Größenordnung 0,1 ... 0,6 K⁻¹.

Typische *Strom-Spannungs-Charakteristiken* bei verschiedener Umgebungstemperatur zeigt **Bild 2.19**. Der Verlauf wird hervorgerufen durch die Überlagerung der positiven Widerstandsänderung mit der Temperatur und einer Widerstandsabnahme mit steigender Spannung (Varistoreffekt). Der Widerstand ist außerdem frequenzabhängig. Der hohe positive TK eines PTC-S-Thermistors gilt nur für Gleichstrom bzw. Netzfrequenz; er wird für höhere Frequenzen stark herabgesetzt.

Anwendung: Temperaturfühler, Überlastschutz, Regelung, Verzögerungsglieder. Die höhere Regelsteilheit gegenüber NTC-Thermistoren ist verbunden mit größeren Toleranzen aller Kennwerte und Betriebsparameter.

2.1.1.5 Spannungsabhängige Festwiderstände (Varistoren)

Varistoren werden aus Sinterkeramiken, meist SiC-Basis, hergestellt. Die starke Spannungsabhängigkeit beruht auf der Ladungsträgersteuerung in den polykristallinen Übergängen. Die

Strom-Spannungs-Kennlinie gehorcht der Beziehung

$$U = C_0 I^{\beta^*} + C_1 I;$$

C_0, C_1 Formfaktoren, nur von der Geometrie des Varistorbauelements abhängig, β^* Nichtlinearitätskoeffizient (auch Regelfaktor), vom Werkstoff und seiner thermischen Vorbehandlung abhängig.

Der 1. Summand kann bei kleinen Strömen (< 1 mA), der 2. Summand bei großen Strömen (> 10 mA) vernachlässigt werden. Dementsprechend kann C_0 leicht aus Strom- und Spannungsmessung bei großem Strom und C_1 bei kleinem Strom ermittelt werden, β^* läßt sich durch zwei Messungen bei großen Strömen bestimmen:

$$\beta^* = \frac{\lg(U_1/U_2)}{\lg(I_1/I_2)}.$$

Die *Temperaturabhängigkeit* des Nichtlinearitätskoeffizienten β^* ist vernachlässigbar klein, die Formfaktoren C_0 und C_1 haben einen negativen TK ($\approx -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), so daß bei konstantem Strom die Spannung um etwa 0,15 %/K Temperaturerhöhung abnimmt.

Die Belastbarkeit hängt vom Volumen bzw. von der Masse des Bauelements ab. Sie darf den *spezifischen Wärmeumsatz* $W' = 6 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{s/kg} = 60 \text{ W} \cdot \text{s/g}$ nicht überschreiten. Diese Zahl kann sowohl für die zulässige Impuls- oder Wechselstrombelastung als auch für Gleichstromdauerbelastung zugrunde gelegt werden.

Varistoren sind wegen der dielektrischen Eigenschaften des Werkstoffs frequenzabhängig und nur etwa bis 5 kHz anwendbar.

Anwendung: Spannungsstabilisierung, Überspannungsschutz, Funkenlöschung.

2.1.2 Kondensatoren

2.1.2.1 Grundlagen der Bauelementefunktion

Definition und Berechnung der Kapazität. Ein Kondensator besteht aus elektrisch leitenden Bereichen (Elektroden), die durch isolierende Gebiete (Dielektrika) voneinander getrennt sind. Schließt man die leitenden Bereiche an eine Spannungsquelle an, so laden sich die Elektroden mit Ladungen unterschiedlichen Vorzeichens auf. Die Beträge der Ladung Q und der anliegenden Potentialdifferenz $U_2 - U_1$ sind einander proportional. Als Proportionalitätsfaktor wird die *Kapazität* C definiert:

$$C \equiv \left| \frac{Q}{U_2 - U_1} \right|. \quad (2.8)$$

Die Einheit der Kapazität ist das Farad (F):

$$1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s/V} = 1 \text{ C/V} = 1 \text{ s}/\Omega = 1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2.$$

Die Kapazität hängt von der Geometrie der Leiteranordnung bzw. der Dielektrika und von der Polarisierbarkeit der Dielektrika ab.

Bei gegebener elektrischer Feldstärke E und Polarisierung P ist die elektrische Flußdichte (Verschiebung) D bestimmt durch

$$D = \varepsilon_0 E + P; \quad (2.9)$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ elektrische Feldkonstante.

Setzt man

$$P \equiv \alpha_p E, \quad (2.10)$$

womit als Materialeigenschaft die *Polarisierbarkeit* α_p des (isotropen) Dielektrikums eingeführt ist, so folgt aus (2.9) und (2.10) wegen

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

der Ausdruck

$$\varepsilon_r = 1 + \alpha_p / \varepsilon_0$$

für die *Permittivitätszahl* (*Dielektrizitätszahl*, DK) ε_r . Im Vakuum gilt wegen $\alpha_p = 0$ $\varepsilon_r = 1$. ε_r ist temperatur-, frequenz- und spannungs- sowie altersabhängig.

Für einige typische Vertreter von dielektrischen Werkstoffen der Kondensatortechnik sind die praktisch genutzten ε_r -Wertebereiche in **Tafel 2.21** angegeben.

Tafel 2.21 ϵ_r -Bereiche typischer Dielektrika von Kondensatoren (Raumtemperatur, NF-Bereich)

Dielektrikum	typischer Werkstoff	typischer Vertreter	ϵ_r
Vakuum	–	–	1
Gas	Preßgas	O ₂ /N ₂ (Luft) + CCl ₄	1,0006
Flüssigkeit	Öl	Mineralöl	2,2 ... 5,3
Lack	Polymerisatlack	Celluloselack	3,2 ... 6,4
Kunststoff	Polymerisatfolie	Polypropylen	2,2 ... 2,7
Papier	Cellulose	Kondensatorzellstoff	0,8 ... 1,3
anorganische nicht-oxidische Verbindung	Fluoriddünnschicht	MgF ₂	5 ... 6,5
Glimmer	Mineralglimmer	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH ₂)	6,5 ... 8,7
Porzellan	Kaolin/Quarz/Feldspat	Kondensatorporzellan	5 ... 7
Keramovitron	Keramik/Glas-Dickschichtpaste	Bi ₂ O ₃ -PbSiO ₃ -Nb ₂ O ₅	≤ 70
Glaskeramik (Vitrokeramik)	Keimbildner/Glas	TiO ₂ /BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	≤ 800
amorphes Glas	Silikatglas	SiO ₂ -B ₂ O ₃ -Na ₂ O	4 ... 10
Keramik	Titanat	BaTiO ₃	5 ... 12000
Metalloxid	Oxiddünnschicht	anodisches Ta ₂ O ₅	3 ... 80
		thermisches SiO ₂	22 ... 27
		anodisches (Al ₂ O ₃ /TiO ₂)	4 ... 6
		anodisches (Al ₂ O ₃ /Ta ₂ O ₅)	≈ 17
Metalloxid-Komposit	Oxid(1)/Oxid(2)-Dünnschicht		19 ... 22

Bei konstantem ϵ_r und beliebiger Elektrodenanordnung gilt wegen (2.8)

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oint_A \mathbf{D} \, d\mathbf{A}}{\int_1^2 \mathbf{E} \, ds} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \oint_A \mathbf{E} \, d\mathbf{A}}{\int_1^2 \mathbf{E} \, ds}; \quad (2.11)$$

A Flächenvektor, s Ortsvektor.

Die Elektroden-Dielektrikum-Grenzflächen bestimmen Anfangs- und Endpunkt (1,2) des Wegintegrals im Dielektrikumsgebiet, durch dessen Begrenzungsfläche der Verschiebungsfluß hindurchtritt.

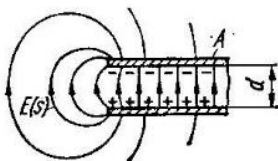


Bild 2.20
Feldstärkeverteilung am Plattenkondensator

Bild 2.20 zeigt den einfachen Plattenkondensator im Randbereich mit eingetragener Feldstärkeverteilung. Für große Fläche A und kleinen Plattenabstand d gilt

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}. \quad (2.12)$$

Sind diese Voraussetzungen verletzt, so ist der äußere Feldverlauf gemäß (2.11) zu berücksichtigen, und C wird etwas größer als nach (2.12) berechnet (Kapazität häufiger Elektrodenanordnungen s. Bd. 1, Tafel 1.4).

Theoretische Beschreibung von Kondensatoren. Die theoretischen Grundlagen der Bauelementefunktion von Kondensatoren werden in teilweise guter qualitativer Übereinstimmung mit Meßwerten aus der i. allg. intuitiv festgelegten Ersatzschaltung abgeleitet.

Ausgehend von der großen Vielfalt der Vorgänge im Kondensator ist die physikalische Ersatzschaltung eine Beschränkung auf das Wesentliche, indem entsprechend der zu bestimmenden Bauelementefunktion bestimmte kapazitive, resistive und induktive Phänomene herausgegriffen werden. In diesem Sinne enthalten die komplexe Impedanz Z bzw. die komplexe Admittanz Y alle wichtigen Informationen.

So berechnen sich die Größen einer Ersatzschaltung, bestehend aus Serienkapazität C_s und Serienwiderstand R_s , aus der komplexen Eingangsimpedanz Z_e des Kondensators wie folgt:

$$C_s = \frac{1}{\omega \operatorname{Im} Z_e}, \quad R_s = \operatorname{Re} Z_e, \quad \tan \delta_s = \frac{\operatorname{Re} Z_e}{\operatorname{Im} Z_e} = \omega C_s R_s;$$

ω Kreisfrequenz, $\tan \delta_s$ Serienverlustfaktor.

Die Beschreibung mit lokalisierten Parametern hat sich für den Bereich niedriger Frequenzen als ausreichend erwiesen, während der Bereich höherer Frequenzen nur mit dem Modell der verteilten Parameter qualitativ richtig erfaßt wird. Die mit lokalisierten Parametern gewonnenen Erfahrungen sind bei der Einführung des Modells der verteilten Parameter übernommen worden.

Wesentlich für den Schritt von lokalisierten zu verteilten Parametern ist die Erkenntnis, daß insbesondere bei höheren Frequenzen die räumlich-differentielle Parameterverteilung im Bauelement entscheidend seine Funktion übernimmt. Man hat allerdings bei eindimensionaler Betrachtungsweise damit zu rechnen, daß raumtypische Informationen des dreidimensional konstruierten Bauelements verlorengehen. Deshalb wird das System quantitativ richtiger mit stetig verteilten Ortsfunktionen im dreidimensionalen Raum beschrieben. Der in der Folge dieser Modellvorstellungen wachsende mathematische Aufwand, der bei numerischen Betrachtungen zunehmend den Einsatz der Rechentechnik erfordert, geht naturgemäß auf Kosten der Übersichtlichkeit und der einfachen Handhabbarkeit. Deshalb haben einfache Methoden zur Trendabschätzung der Bauelementfunktion keinesfalls an Bedeutung verloren. Allerdings kann man beim Entwurf moderner Kondensatorbauelemente, insbesondere unter solchen Aspekten wie Miniaturisierung, Materialsubstitution, Erhöhung der Zuverlässigkeit, auf die exakten Verfahren künftig nicht verzichten.

Die prinzipiellen Unterschiede der Herangehensweise sind anhand einfacher Modellbeispiele in **Tafel 2.22** zu erkennen.

Das erste Beispiel zeigt die Ersatzschaltung eines Kondensators mit der verlustfreien Kapazität C , der der Isolationswiderstand R_2 des Dielektrikums parallelgeschaltet ist. In Reihe dazu liegt der Widerstand R_1 , der die seriellen resistiven Komponenten, z. B. der Elektroden, in dieser lokalisierten Modellvorstellung repräsentiert.

Die Modelle der verteilten Parameter bauen auf einem Kontinuum von Elementarzellen der Struktur auf (Volumen: Δx im 1D- und ΔV im 3D-Fall), die gemäß **Tafel 2.22** die den einzelnen Richtungen n_k ($k = x, y, z$) zugeordneten resistiven Bahnwiderstandskomponenten ΔR_k – sie lassen sich auf den spezifischen Widerstand ρ_x bzw. ρ_V zurückführen – und die län- gen- bzw. volumenspezifischen idealen Kapazitätsdichten ϵ_x bzw. ϵ_V enthalten. Diese Betrachtungsweise führt auf Differentialgleichungen, die unter Beachtung der entsprechenden Randbedingungen zu lösen sind.

Die Ableitung der Differentialgleichung für den 1D-Fall der verteilten Parameter (Beispiel B in **Tafel 2.22**) geschieht wie folgt: Bei Anwendung der Knotenregel und des Maschensatzes folgt

$$I(x) = I(x + \Delta x) + I_C(x + \Delta x) \quad \text{und} \quad U(x) - U(x + \Delta x) = R_x I(x).$$

Ferner gilt

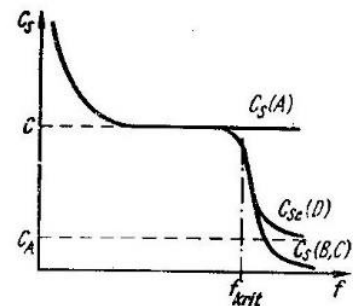
$$I_C(x + \Delta x) = j\omega \Delta C U(x + \Delta x).$$

Nach Einsetzen von ΔC und ΔR_x und Grenzübergang ergibt sich

$$\frac{-dU}{dx} = \rho_x I, \quad \frac{-dI}{dx} = j\omega C U,$$

woraus man die gesuchte Differentialgleichung erhält.

Bild 2.21
Qualitative Unterschiede der Frequenzabhängigkeit der Serienkapazität (Modelle nach **Tafel 2.22**)



Als Beispiel zeigt **Bild 2.21** die qualitativen Unterschiede, die sich für die praktisch interessante Frequenzabhängigkeit der Serienkapazität bei Anwendung der verschiedenen Modelle aus **Tafel 2.22** ergeben [2.22]. Am auffälligsten ist das Auftreten einer *kritischen Frequenz* f_{krit} im Fall der Modelle mit verteilten Parametern, oberhalb der die Serienkapazität in Übereinstimmung mit dem tatsächlichen Befund bei Kondensatoren stark abfällt.

Genauere Rechnungen unter Beachtung geometrischer Aspekte zeigen, daß f_{krit} mit Abnahme eines Parameters $\tilde{\alpha} \equiv \epsilon l^2$ wächst, worin l eine lineare Abmessung des Bauelements bedeutet.

Tafel 2.22 Kondensatormodelle mit lokalisierten und verteilten Parametern

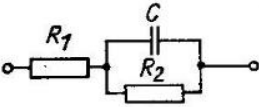
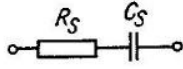
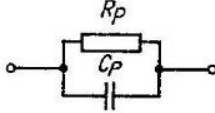
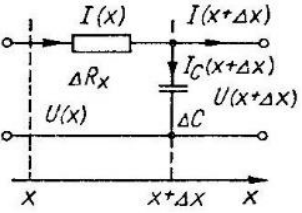
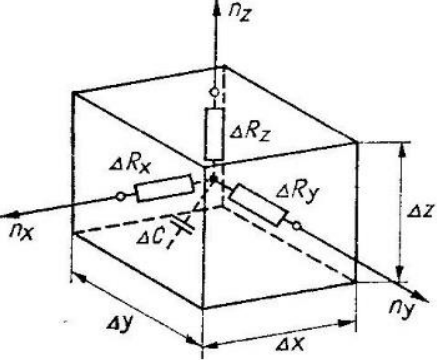
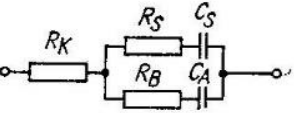
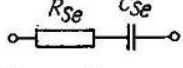
Modellbeispiel	Bestimmungsgleichungen in allgemeinsten Form
<p>A lokalisierte Parameter</p> 	<p>Seriensatzparameter:</p>  $C_S = \frac{1 + (\omega C R_2)^2}{\omega^2 C R_2^2}$ $R_S = R_1 + \frac{R_2}{1 + (\omega C R_2)^2}$ <p>Parallelsatzparameter:</p>  $C_P = C \frac{1}{(1 + R_1/R_2)^2 + (\omega C R_1)^2}$ $R_P = R_2 \frac{(1 + R_1/R_2)^2 + (\omega C R_1)^2}{1 + R_1/R_2 + (\omega C)^2 R_1 R_2}$
<p>B verteilte Parameter, eindimensional</p> 	<p>periodische Zeitabhängigkeit:</p> $\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} - \tilde{i}^2 U(x) = 0$ $\tilde{i}^2 = j \omega \epsilon_x \epsilon_x$ $\Delta C = \epsilon_x \Delta x$ $\Delta R_x = \rho_x \Delta x$ <p>Randbedingung: $U_{\text{Rand}} = U_0$</p>
<p>C verteilte Parameter, dreidimensional</p> 	<p>periodische Zeitabhängigkeit:</p> $\frac{\partial^2 U(r)}{\partial r^2} - \tilde{i}^2 U(r) = 0$ $\tilde{i}^2 = j \omega \epsilon_v \epsilon_v$ $\Delta C = \epsilon_v \Delta V$ $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ $\Delta R_k = \frac{\rho_k \Delta k}{\prod_{l \neq k} \Delta l} \quad (k, l = x, y, z)$ <p>Randbedingung: $U_{\text{Rand}} = U_0$</p>
<p>D kombinierte Modelle (Kombination lokalisierter und verteilter Parameter)</p> 	<p>Seriensatzparameter:</p>  $C_{Se} = C_S \frac{(1 + \frac{C_A}{C_S})^2 + [\omega C_A R_S (1 + \frac{R_B}{R_S})]^2}{\left\{ \left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right) (1 - \omega^2 C_A C_S R_B R_S) + \omega^2 C_A C_S R_S^2 \right\} \times \left(1 + \frac{C_A R_B}{C_S R_S}\right) \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right)}$ $R_{Se} = R_S \frac{\left\{ 1 + \frac{R_B}{R_S} + \frac{R_K}{R_S} \left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)^2 + (\omega C_A R_S)^2 \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right) \right\} \times \left[\frac{R_B}{R_S} + \frac{R_K}{R_S} \left(1 + \frac{R_B}{R_S}\right) \right]}{\left(1 + \frac{C_A}{C_S}\right)^2 + [\omega C_A R_S (1 + \frac{R_B}{R_S})]^2}$

Bild 2.22 veranschaulicht dies für den 3D-Fall (Beispiel C in Tafel 2.22) der zylindrischen porösen Anode eines Elektrolytkondensators. Die Frequenz (ω_{min}) des Minimums des Verlustfaktors als weiterem charakteristischem Kondensatorparameter ist ebenfalls stark geometrieabhängig, wie aus **Bild 2.23** hervorgeht. Eine weitere Modellverbesserung läßt sich durch Kombination lokalisierter und verteilter Parameter erzielen. Der Fall D in Tafel 2.22 entspricht dem verbesserten Modell des Festelektrolytkondensators mit poröser Anode. Er berücksichtigt das 3D-Kontinuum (Metallanode/Oxiddielektrikum/Manganoxidkatode) des porösen Anodenvolumens in Form der nach Beispiel C berechneten Serieneratzgrößen C_s und R_s sowie die lokalisierten Parameter in Form des Widerstandes R_K der Kontaktierung,

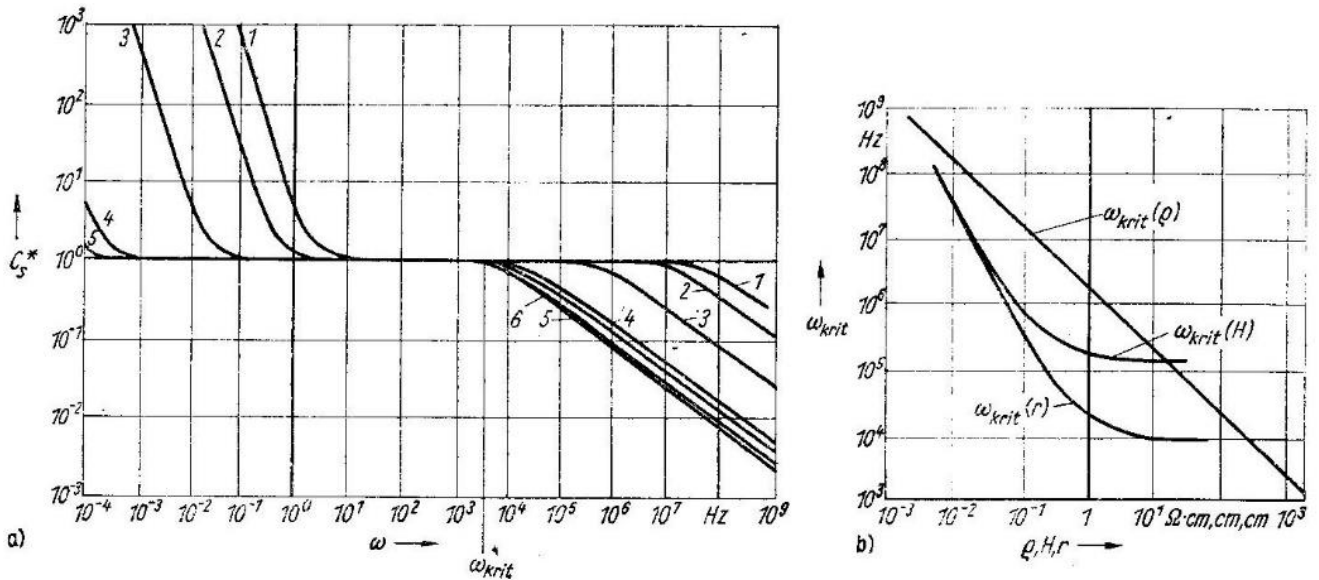


Bild 2.22 Normierte Serieneratzkapazität und kritische Kreisfrequenz des Elektrolytkondensators mit zylindrischer poröser Anode

(Normierung auf C_s bei $f = 50$ Hz) [2.23]

- 1 $r = 0,07$ mm; 4 $r = 7$ mm;
- 2 $r = 0,15$ mm; 5 $r = 70$ mm;
- 3 $r = 0,7$ mm; 6 $r = 700$ mm

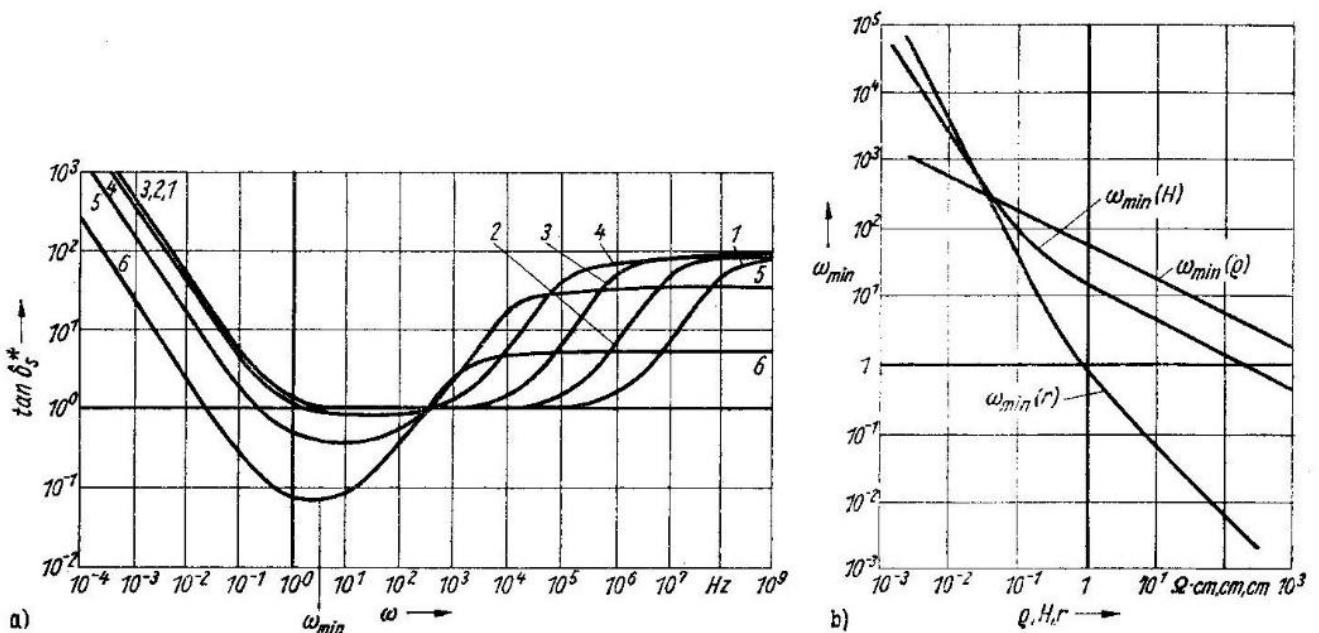
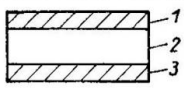
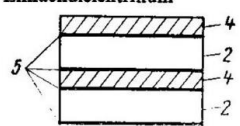
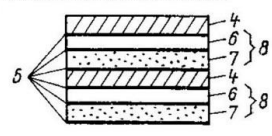
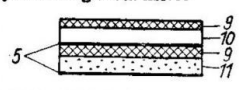
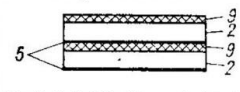
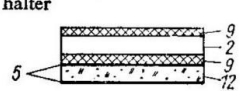
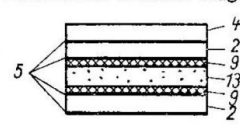
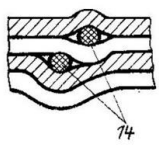
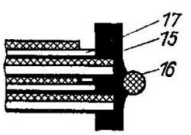
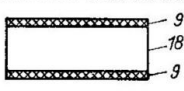
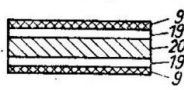
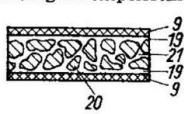
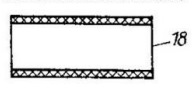

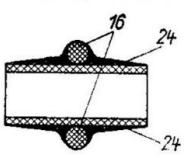
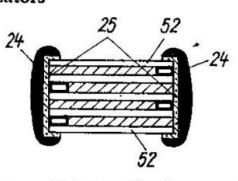
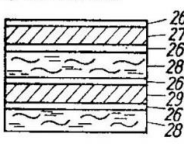
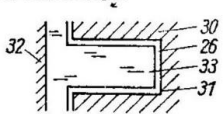
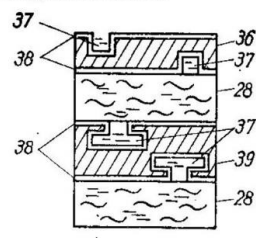
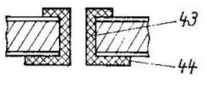
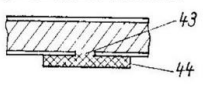
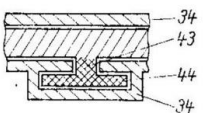


Bild 2.23 Normierter Serienverlustfaktor und Kreisfrequenz des Verlustfaktorminimums des Elektrolytkondensators mit zylindrischer poröser Anode

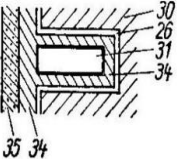
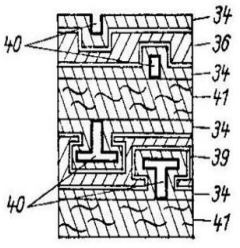
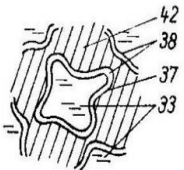
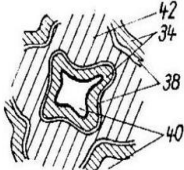
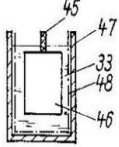
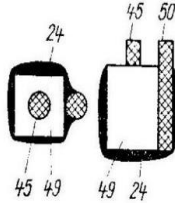
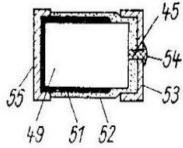
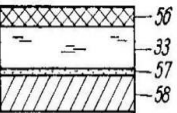
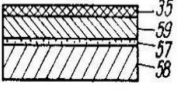
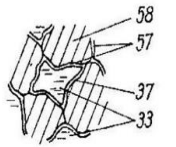
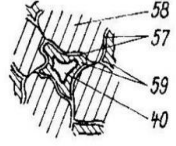
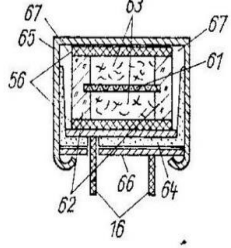
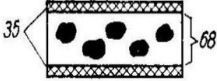

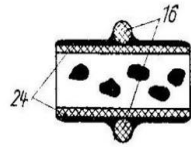
(Normierung auf $\tan \delta_s$ bei $f = 50$ Hz) [2.23]

- 1 $q = 0,01 \Omega \cdot \text{cm}$ 4 $q = 10 \Omega \cdot \text{cm}$
- 2 $q = 0,1 \Omega \cdot \text{cm}$ 5 $q = 100 \Omega \cdot \text{cm}$
- 3 $q = 1 \Omega \cdot \text{cm}$ 6 $q = 1000 \Omega \cdot \text{cm}$

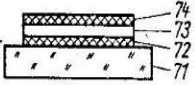
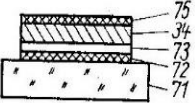
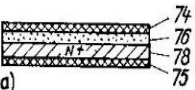
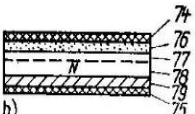

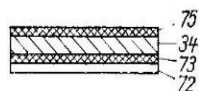
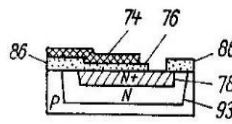
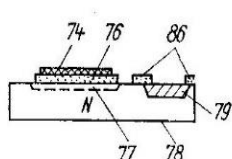
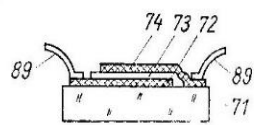
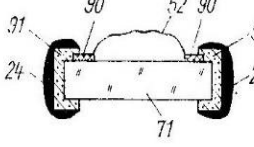
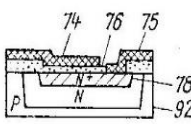
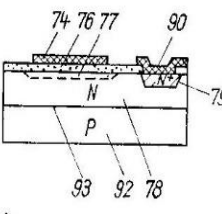
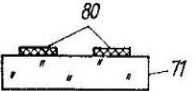
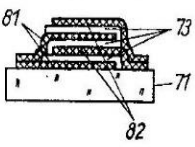
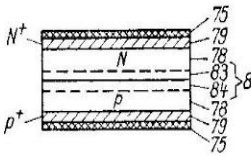
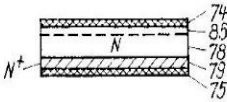
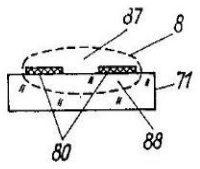
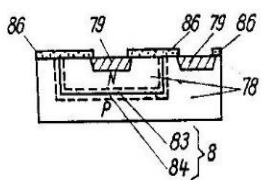
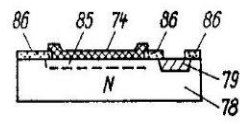
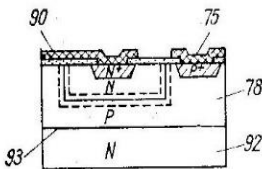
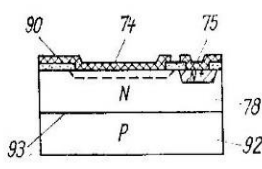
Tafel 2.23 Grundstrukturen, Elementarzellen und Kontaktvarianten von Festkondensatoren

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktvarianten	Benennung
<p>Foliewickelkondensatoren</p> 	<p>Foliewickel bzw. -stapel Einfachdielektrikum</p>  <p>Kombinationsdielektrikum</p>  <p>Kombinationsdielektrikum, je einseitig metallisiert</p>  <p>Einfachdielektrikum, je einseitig metallisiert</p>  <p>Einfachdielektrikum, beidseitig metallisiert; feldfreier Abstands- halter</p>  <p>Einfachdielektrikum; beidseitig metallisierter feldfreier Träger</p> 	<p>Einlegerkontaktierung</p>  <p>Stirnflächenkontakt</p> 	<p>1 Metallelektrode I 2 Foliedielektrikum 3 Metallelektrode II 4 Elektrodenfolie 5 Luftspalt (ggf. imprägniert, z.B. Öl, DMF) 6 Dielektrikum I 7 Dielektrikum II 8 Kombinationsdielektrikum 9 Schichtelektrode 10 metallisiertes Dielektrikum I 11 metallisiertes Dielektrikum II 12 Abstandshalterfolie 13 beidseitig metallisierte Trägerfolie 14 eingelegter Anschlußdraht 15 Stirnflächenmetallisierung (z.B. lötl- bzw. schweißbarer Schoopbelag) 16 Anschlußdraht (angelötet bzw. angeschweißt) 17 Freirand</p>
<p>Keramikkondensatoren</p> <p>Scheiben- bzw. Foliedielektrikum</p>  <p>Oberflächensperrschicht</p>  <p>Korngrenzensperrschicht</p> 	<p>Scheibendielektrikum</p>  <p>Foliedielektrikum</p> 	<p>Armierung eines Scheibenkondensators</p>  <p>Kontaktierung eines kerami- schen Vielschicht-Chipkonden- sators</p> 	<p>18 Scheiben- bzw. Foliedielektrikum 19 Oberflächensperrschicht 20 leitfähige (reduzierte) Keramik 21 Korngrenzensperrschicht 22 Scheibendielektrikum 23 Foliedielektrikum 24 Lotbelag 25 Stirnflächenkontaktbelag (lötfähig)</p>
<p>Elektrolytkondensatoren</p> <p>Flüssigelektrolyt</p> <p>a) Foliewickel</p>  <p>b) Sinterkörper</p> 	<p>Flüssigelektrolyt, aufgeraute Folien</p> 	<p>Durchreibkontakt</p>  <p>US-Schweißkontakt</p> <p>a) vor dem Formieren</p>  <p>b) nach dem Formieren</p> 	<p>26 Dünnschichtdielektrikum 27 Anodenfolie 28 Abstandshalter (porös, elektrolytprägniert) 29 Katodenfolie 30 Anodenmetall 31 Pore 32 Katodenmetall (z.B. Gehäuse) 33 Flüssigelektrolyt (z.B. H₂SO₄) 34 Festelektrolyt-Katodenbelag (z.B. β-MnO₂) 35 Kontaktierbelag 36 Anodenfolie (aufgeraut) 37 Pore (elektrolytgefüllt) 38 anodisches Oxiddielektrikum 39 Katodenfolie (hochaufgeraut) 40 Pore (gasgefüllt) 41 Abstandshalter (festelektrolytgefüllt) 42 poröser Sinterkörper (Ventilmaterialgerüst) 43 Foliekontakt 44 Anschlußfahne</p>

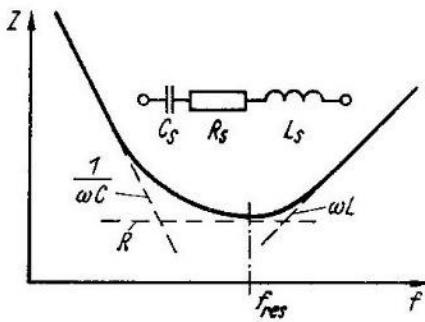
Tafel 2.23 (Fortsetzung)

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktvarianten	Benennung
<p>Elektrolytkondensatoren Festelektrolyt, Sinterkörper</p> 	<p>Festelektrolyt, aufgerauhte Folien</p>  <p>Flüssigelektrolyt, poröser Sinterkörper</p>  <p>Festelektrolyt, poröser Sinterkörper</p> 	<p>Anoden- und Katodenkonstruktion von Elektrolytkondensatoren mit Flüssigelektrolyt und poröser Sinteranode</p>  <p>Armierung von Festelektrolytkondensatoren</p>  <p>Armierung von Festelektrolyt-Chipkondensatoren</p> 	<p>45 Anodendraht 46 beschichteter Sinterkörper (anodisch oxidiert) 47 katodisches Gehäuse (elektrolytgefüllt) 48 Katodenbelag (mit sehr hoher spezifischer Oberfläche, z.B. Platinmohr) 49 beschichteter Sinterkörper (lötfähig kontaktiert) 50 Katodendraht 51 Katodenbelag (mit Lot bzw. Leitkleber beschichtet) 52 Umhüllung 53 Anodenkappe (lötfähig) 54 Punktschweißverbindung 55 Katodenkappe (lötfähig)</p>
<p>Doppelschichtkondensatoren Doppelschicht fest/flüssig</p>  <p>Doppelschicht fest/fest</p> 	<p>poröser Preßkörper</p> <p>a) Flüssigelektrolyt</p>  <p>b) Festelektrolyt</p> 	<p>Kondensatorkonstruktion mit unipolarer Grundzelle</p> 	<p>56 Katodenelektrode (z.B. Leitgummi) 57 Doppelschicht 58 poröse Anodenelektrode 59 Ionenleiterbelag (Katode, z.B. $RbAg_4J_2$) 60 poröser Preßkörper (z.B. Aktivkohlegerüst) 61 ionenpermeabler Separator 62 Gummiring (isolierend) 63 Aktivkohlepreßkörper (porös, elektrolytimprägniert) 64 Isolator 65 Gehäuse (Metallelektrode I) 66 Deckel (Metallelektrode II) 67 Hohlraum (gasgefüllt)</p>
<p>Kondensatoren mit Kompositdielektrikum</p> 		<p>Konstruktion mit Festkörper-Scheibendielektrikum</p> 	<p>68 Kompositdielektrikum 69 Matrix (z.B. Oxidkeramik) 70 Einschlußphase (z.B. Metallpartikel)</p>

Tafel 2.23 (Fortsetzung)

Grundstrukturen	Elementarzellen	Kontaktvarianten	Benennung
<p>Schicht- und Halbleiterkondensatoren</p> <p>MIM-Schichtkondensator</p>  <p>MIFEM-Schichtkondensator</p>   	<p>MIM-Schichtstapel</p>  <p>MIFEM-Schichtstapel</p>  <p>a)</p>  <p>b)</p> 	<p>Schichtkondensator, gebondet</p>  <p>Schicht-Chipkondensator</p>  <p>MIS-Kondensator, kontaktiert</p> <p>a)</p>  <p>b)</p> 	<p>71 Substrat (isolierend) 72 Grundleiterschicht 73 Schichtdielektrikum 74 Deckeleiterschicht 75 Kontaktierschicht 76 Feldisolatorschicht (Dielektrikum I) 77 Verarmungsrandschicht (Dielektrikum II) 78 Halbleitergrundleiterschicht (Bahngebiet) 79 ohmscher Kontakt 80 Streifenelektroden 81 Schichtelektroden-Gruppe I 82 Schichtelektroden-Gruppe II 83 Dielektrikum I (N-Verarmungsschicht) 84 Dielektrikum II (P-Verarmungsschicht) 85 Schottky-Sperrschichtdielektrikum 86 Abdeckisolatorschicht 87 Dielektrikum I (Luft) 88 Dielektrikum II (Substratisolator) 89 Bonddraht</p>
<p>Streifenkondensator</p>  <p>Vielschichtkondensator (substratgestützt)</p>  <p>PN-Sperrschichtkondensator</p>  <p>Schottky-Sperrschichtkondensator</p> 	<p>Streifenstruktur</p>  <p>Struktur des PN-Kondensators</p>  <p>Struktur des Schottky-Kondensators</p> 	<p>PN-Kondensator, kontaktiert</p>  <p>Schottkykondensator, kontaktiert</p> 	<p>90 Elektrodenanschlußschicht 91 Kontaktbelag (lötfähig, über Kanten geführt) 92 Halbleitersubstrat 93 isolierender PN-Übergang</p>

der Kapazität C_A der äußeren geometrischen Oberfläche und des Bahnwiderstandes R_B der porösen Anode. Will man parasitäre Induktivitäten in die Modellbetrachtungen einbeziehen, so ist dies bei niedrigen Frequenzen in lokalisierter Form zulässig (z.B. Erweiterung der Modelle A und D in Tafel 2.22 durch Einfügen der Induktivität L in Serie zu R_1 bzw. R_K). Der Betrag von L ist dabei im wesentlichen durch die Anschlußdrähte bestimmt. Bei höheren Frequenzen hat man bei unbedrahteten Bauelementen auch die induktiven Anteile als verteilte Parameter aufzufassen. **Bild 2.24** zeigt schematisch die Impedanz eines Kondensators, der als lokalisierte Reihenschaltung von Kapazität, Widerstand und Induktivität aufgefaßt wurde (Reihenschwingkreis), in Abhängigkeit von der Frequenz. Sie wird bei niedrigem f



durch den kapazitiven und oberhalb der Resonanzfrequenz f_{res} durch den induktiven Scheinwiderstand bestimmt. Im mittleren Bereich hat der Wirkwiderstand mehr oder weniger starken Einfluß.

Bild 2.24
Impedanz des Kondensators mit seriellen R- und L-Parametern in Abhängigkeit von der Frequenz

Dielektrikum. Das Dielektrikum ist der eigenschaftsbestimmende Bestandteil des Kondensators. Aus applikativer Sicht ist möglichst großes ϵ_r bei kleinem dielektrischem Verlustfaktor $\tan \delta_e$ und sehr großem Isolationswiderstand R_{Is} erwünscht. Da diese und andere Anforderungen teilweise gegenläufig sind, führt die technische Realisierung von Kondensatoren auf ein typisches werkstoffliches und technologisches Optimierungsproblem hinaus, wobei sich nur bestimmte Werkstoffklassen durchsetzen (s. Tafel 2.11). Andererseits leiten sich daraus die Ansatzpunkte der technischen Weiterentwicklung ab.

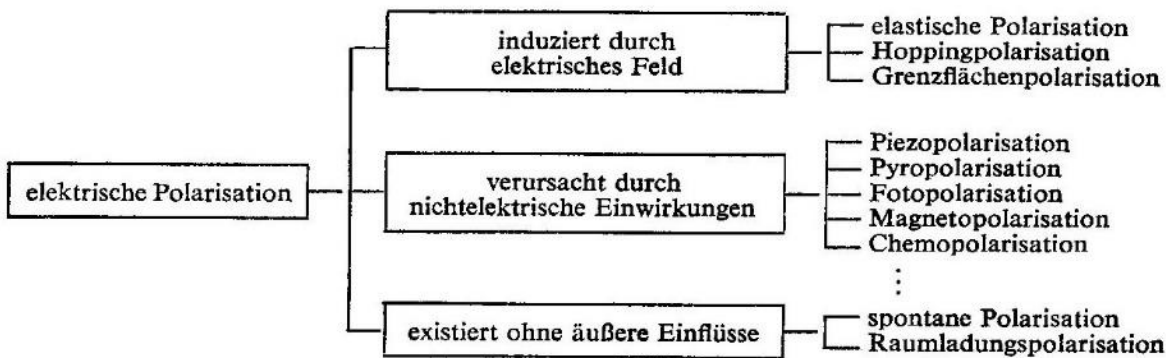


Bild 2.25 Systematik der Polarisationsphänomene

So werden bei weitem nicht alle bekannten Phänomene der dielektrischen Polarisation von Materie kapazitiv benutzt. Die Systematik im **Bild 2.25** unterscheidet nach elektrisch und nichtelektrisch induzierten sowie ohne äußere Einflüsse existierenden Polarisationserscheinungen.

2.1.2.2 Grundaufbau und Grundtechnologien von Kondensatoren

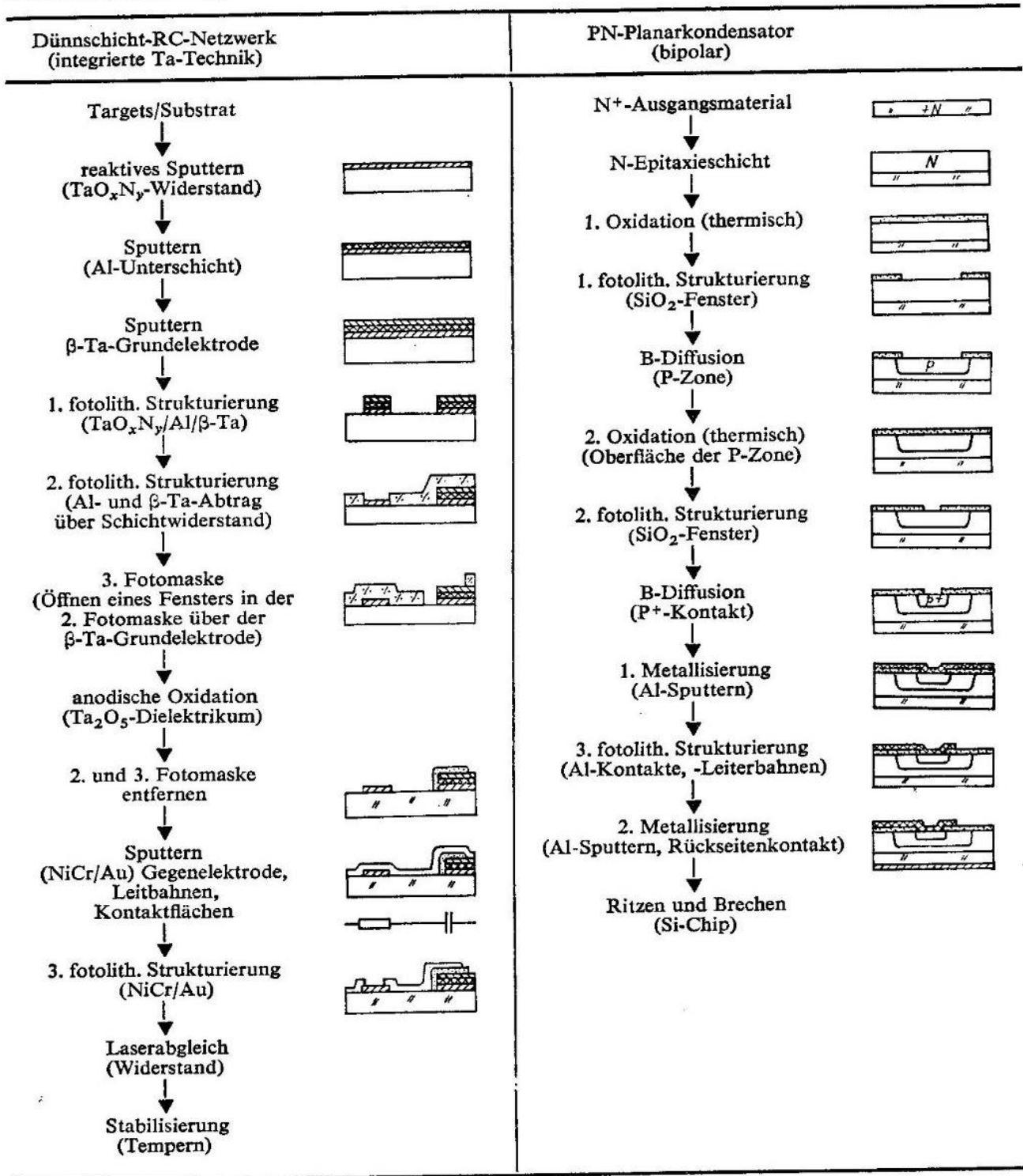
In **Tafel 2.23** sind Grundstrukturen, Elementarzellen und Kontaktvarianten von Festkondensatoren zusammengestellt. Die Grundstruktur berücksichtigt vor allem das werkstoffliche Konzept. Zur Modellierung der Bauelementefunktion nach Abschnitt 2.1.2.1 sind die Elementarzellen ein wichtiger Ansatzpunkt, da sie die innere Struktur konkreter fassen. Zusätzlich sind die Formeinflüsse (z.B. Wickel, Stapel, Formkörper) sowie Kontaktvarianten zu berücksichtigen.

Für die Herstellung von Kondensatoren haben sich bestimmte Technologien herauskristallisiert, deren Bestand trotz ständiger Modifizierung und Weiterentwicklung längerfristig ist (**Tafel 2.24**). Grundlegend ist die Vorfertigung, die man i.allg. bis zum Teilschritt „Kontaktierung“ zählt.

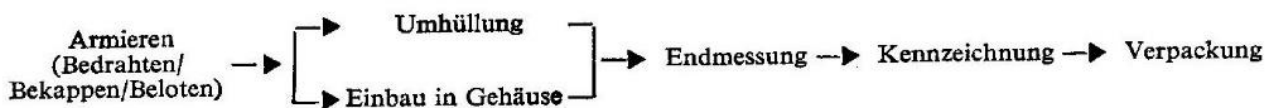
Tafel 2.24 Grobabläufe ausgewählter Kondensatorstechnologien

MK-Schichtkondensatoren	Keramikscheibenkondensatoren (Sperrschicht)	Keramikvielschicht- Chipkondensatoren
<p>Folien</p> <p>↓</p> <p>Wickeln von Mutterkondensatoren</p> <p>↓</p> <p>Kontaktieren (Schoopieren)</p> <p>↓</p> <p>Formstabilisieren (Tempern)</p> <p>↓</p> <p>Aufteilen in Mutterkondensatorringe</p> <p>↓</p> <p>Trennen in Einzelkondensatoren</p>	<p>Rohstoffe</p> <p>↓</p> <p>Mischen (Schlicker)</p> <p>↓</p> <p>Pressen</p> <p>↓</p> <p>Sintern (reduzierend)</p> <p>↓</p> <p>Teiloxidieren</p> <p>↓</p> <p>Metallisieren</p> <p>↓</p> <p>Stapeln/Kleben</p> <p>↓</p> <p>Zuschneiden</p> <p>↓</p> <p>Vereinzeln (Kleber lösen)</p>	<p>Rohstoffe</p> <p>↓</p> <p>Mischen (Schlicker)</p> <p>↓</p> <p>Gießen</p> <p>↓</p> <p>Metallisieren (Dickschichtpaste)</p> <p>↓</p> <p>Stapeln</p> <p>↓</p> <p>Stanzen</p> <p>↓</p> <p>Sintern</p> <p>↓</p> <p>Kontaktieren (Stirnfläche)</p>
Al-Flüssigelektrolytkondensatoren mit geätzter Folie	Ta-Festelektrolytkondensatoren mit poröser Sinteranode	Dickschicht- Chipkondensatoren
<p>Glattfolien</p> <p>↓</p> <p>Ätzen</p> <p>↓</p> <p>Formieren</p> <p>↓</p> <p>Schneiden</p> <p>← Separatorfolien</p> <p>↓</p> <p>Wickeln/Kontaktieren</p> <p>↓</p> <p>Imprägnieren</p>	<p>Pulver</p> <p>↓</p> <p>Formpressen</p> <p>↓</p> <p>Sintern</p> <p>↓</p> <p>Formieren</p> <p>← Zwischenformieren</p> <p>↓</p> <p>Imprägnieren</p> <p>↓</p> <p>Pyrolyse</p> <p>↓</p> <p>Kontaktieren</p>	<p>Pasten/Substrat</p> <p>↓</p> <p>1. Bedrucken (Grundelektrode)</p> <p>↓</p> <p>Einbrennen</p> <p>↓</p> <p>2. Bedrucken (Dielektrikum)</p> <p>↓</p> <p>3. Bedrucken (Dielektrikum)</p> <p>↓</p> <p>Einbrennen</p> <p>↓</p> <p>4. Bedrucken (Gegenelektrode)</p> <p>↓</p> <p>Einbrennen</p> <p>↓</p> <p>Vereinzeln</p> <p>↓</p> <p>Kontaktieren (über Kante, z. B. Au-Paste)</p> <p>↓</p> <p>Einbrennen</p> <p>↓</p> <p>Beloten (über Kante, z. B. Lotpaste)</p>

Tafel 2.24 (Fortsetzung)



Montageablauf



Der Montageabschnitt bzw. der Zyklus II der Bauelementeherstellung läßt sich für alle Kondensatoren gemäß Tafel 2.24 einheitlich gliedern. Als Folge der breiten Einführung der Chipbauelemente, die grundsätzlich unbedrahtet sind, werden die axial und radial bedrahteten Kondensatoren in der Massenproduktion allmählich an Bedeutung verlieren. Vorteile der Chipbauform:

- Reduzierung der Bestückungskosten durch höheren Automatisierungsgrad,
- Verkleinerung der Leiterplattenfläche aufgrund kleiner und vereinheitlichter Grundflächen,

- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Fertigungsautomatisierung,
- geringer Materialverbrauch infolge Miniaturisierung,
- Reduzierung parasitärer RLC-Komponenten im HF-Bereich,
- reparaturfreundliche Bestückung der Verdrahtungsträger.

Einige charakteristische Bauform- und Bestückungstrends gehen aus **Tafel 2.25** hervor. Konstruktionsbeispiele für Kondensatoren mit veränderbarer Kapazität sind im **Bild 2.26** schematisch dargestellt.

Tafel 2.25 Bauform- und Bestückungstrends bei Kondensatoren

Merkmale	Variante				
Bauform	axial	radial	Chip	im Substrat	auf Substrat
Prinzipskizze					
Verpackung	automatisierungsgerechte Gurtung			technologische Integration	
Kontaktierung mit Verdrahtungsträger	Schwailöten		Reflowlöten	Mehrlagenverdrahtung (Keramik/Dickschicht)	Mehrebenen-Leitbahnverdrahtung (Dünnschicht)

K Kleber; L Leitbahn; LP Leiterplatte; S Substrat; Sn Lot; CC Chipcarrier; SC Si-Chip; C Kondensator

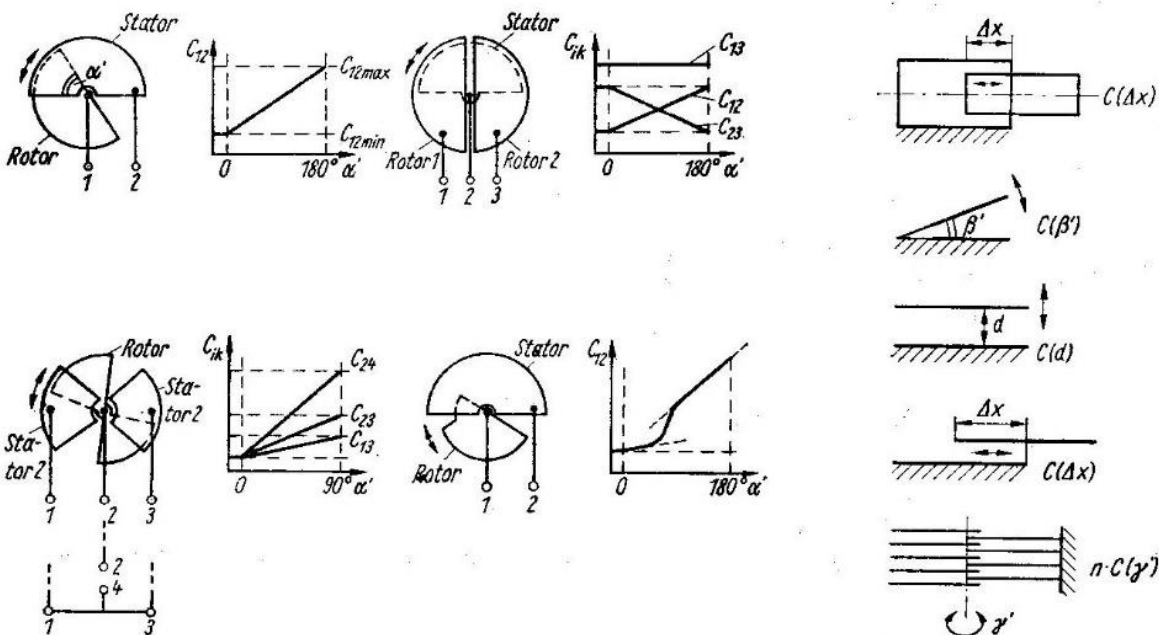


Bild 2.26 Konstruktionsbeispiele und Funktionsprinzipien veränderbarer Kondensatoren

2.1.2.3 Hauptkennwerte von Kondensatoren

Ein Kondensator ist nach seiner **Nennkapazität** (C_N , als Serienkapazität oberwellenfrei bei $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ und $f = 50\text{ Hz}$ gemessen) und nach der **Nennspannung** (U_N , bei Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 20^\circ\text{C}$) bemessen und benannt (**Bild 2.27**).

Nach IEC-Publ. 62 [2.24] [2.25] gilt im Bereich p (10^{-12} , Pico) bis T (10^{12} , Tera) ein einheitlicher Kennzeichnungskode für die Kapazität. Beispiele: p 33 \cong 0,33 pF; 3 n 3 \cong 3,3 nF; 33 μ \cong 33 μ F. Die zulässigen Abweichungen werden durch nachgestellte Buchstaben kodiert.

Weitere wichtige Nenn- bzw. Bemessungsgrößen:

- **Nennstrom (I_N):** Effektivwert des Stromes, für den die Stromleitwege bemessen sind,
- **Nennblindleistung (P_{BN}):** Blindleistung, für die der Kondensator unter Berücksichtigung seiner Verluste bei sinusförmiger Wechselspannung und vorgegebenen Werten der Frequenz, der Umgebungstemperatur und der zulässigen Eigentemperaturerhöhung bemessen ist,
- **Nennverlustleistung (P_{VN}):** Verlustleistung (Wirkleistung), für die der Kondensator bei gegebener Umgebungstemperatur bemessen ist,
- **Nennanfangs- bzw. Nennendkapazität (C_{Nmin}, C_{Nmax}):** bemessene Anfangs- bzw. Endkapazität bei veränderbaren Kondensatoren,
- **Nennfrequenz (f_N):** Niederfrequenz, für die der Kondensator bemessen ist,
- **Nenntemperaturbereich:** Bemessungsbereich mit unterer und oberer Temperaturgrenze ($\vartheta_{min}, \vartheta_{max}$). In diesem Bereich darf $U_g = U_N$ sein, wenn nicht weitere einschränkende Bedingungen (z.B. Derating) festgelegt sind.

Bei den im folgenden mit ¹⁾ gekennzeichneten Kennwerten sind spezielle Standard- oder Herstellervorschriften zu beachten.

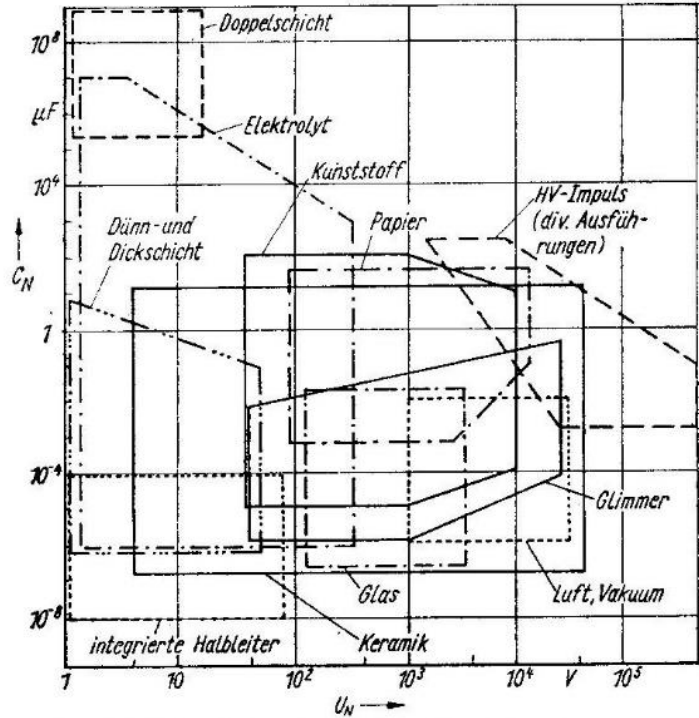


Bild 2.27 Grobeinordnung der C_N, U_N -Bereiche von Festkondensatoren

Spannungskennwerte (Bild 2.28)

- **Grundgleichspannung (U_-):** anliegende reine Gleichspannung
- **Wechselspannung (U_{\sim}):** anliegende reine Wechselspannung
- **Wellenspannung (U_W):** Summe aus anliegenden U_- und U_{\sim}
- **Überspannung (U_U):** kurzzeitig anliegende Amplitude, die über den Scheitelwert von U_W hinausgeht
- **Dauergrenzspannung (U_g):** dauernd anliegende zulässige U_- bzw. Amplituden von U_{\sim} bzw. Scheitelwerte von U_W
- **Betriebsspannung (U_B):** tatsächliche Spannung im Dauerbetrieb
- **Spitzenspannung (U_S)¹⁾:** höchste anliegende zulässige U_B
- **Umpolspannung (U_u):** anliegender zulässiger Scheitelwert einer Spannung umgekehrter Polarität bei gepolten (Kennzeichnung beachten!) Kondensatoren
- **überlagerte Wechselspannung (U_{eff}):** zulässige effektive Wechselspannung, mit der ein Kondensator zusätzlich zum anliegenden U_- belastet werden darf
- **Eigenspannung (U_e)¹⁾:** „innere“ Spannung infolge von Raumladungseffekten

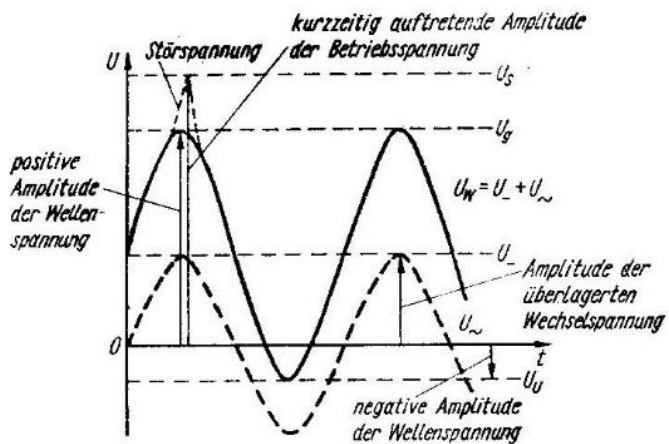


Bild 2.28 Spannungskennwerte von Kondensatoren

- **Prüfspannung (U_p)¹⁾**: Spannung, bei der unter Anwendung einer bestimmten Prüfvorschrift der Isolationswiderstand, der Reststrom, die Durchschlagsspannung oder andere Kennwerte gemessen werden
- **Durchschlagsspannung (U_D)¹⁾**: Spannung, bei der der Isolations- bzw. Reststrom einen bestimmten Wert überschreitet bzw. das Dielektrikum irreversibel zerstört wird
- **Impulsbelastbarkeit (dU/dt)¹⁾**: zulässiger Spannungsanstieg bei gegebener U_-
- **Spannungsderating¹⁾**: Vorschrift zur Reduzierung von U_g bei $\vartheta_B > \vartheta_{max}$

Strom- und Leistungskennwerte

- **Isolationsstrom (I_{Is})¹⁾**: fließender Gleichstrom bei Anlegen einer U_-
- **Dauergrenzstrom (I_g)**: dauernd anliegender zulässiger höchster Stromstärkeeffektivwert
- **überlagerter Effektivstrom (I_{eff})**: zulässige effektive Wechselstromstärke zusätzlich zum fließenden Gleichstrom (Isolationsstrom, Reststrom)
- **Reststrom (I_R , **Tafel 2.26**)¹⁾**: bei anliegender U_- ständig fließender Strom, dessen Betrag mit der Zeit asymptotisch auf einen Endwert sinkt
- **Isolationswiderstand (R_{Is} , **Tafel 2.26**)¹⁾**: Gleichstromwiderstand bei Anlegen einer Prüfgleichspannung U_p
- **Dauergrenzleistung (P_g)**: dauernd anliegende zulässige P_N im f_N -Bereich und bei festgelegter ϑ_U
- **Grenzleistung (P_{max})**: Leistung (bei f_N, ϑ_N), die am Kondensator nach Einstellen des Temperaturgleichgewichts eine festgelegte Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{max}$ bewirkt
- **Schaltfestigkeit, Schaltbelastbarkeit, Stoßentladefestigkeit¹⁾**: zulässige Kennwertänderung (z. B. Kapazitätsänderung) bei einer bestimmten Anzahl von impulsförmigen Lade- bzw. Entladevorgängen
- **Verlustfaktor ($\tan \delta$, **Bild 2.29**)¹⁾**: Maß für die im gesamten Kondensator in Wärme umgesetzte elektrische Energie, die zur Temperaturerhöhung des Bauelements im Betriebszustand beiträgt
- **dielektrischer Verlustfaktor ($\tan \delta_e$, **Bild 2.30**)¹⁾**: Maß für die im Dielektrikum in Wärme umgesetzte elektrische Energie

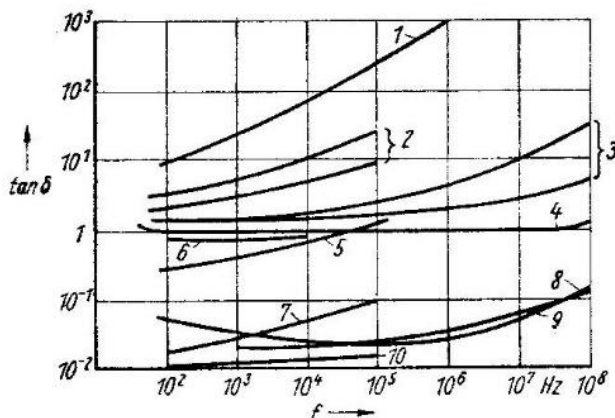


Bild 2.29

Verlustfaktor verschiedener Kondensatoren in Abhängigkeit von der Frequenz ($\vartheta = 25^\circ\text{C}$)

1 Elektrolyt (poröse Anode); 2 Klasse-III-Keramik; 3 Klasse-II-Keramik; 4 Klasse-I-Keramik; 5 KT (Polyester); 6 Oxide ($\text{Ta}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_3$) in MIM; 7 KP (Polypropylen); 8 Porzellan; 9 Glas; 10 KS (Polystyrol)

Temperaturkennwerte

- **Umgebungstemperatur (ϑ_U)**: Temperatur der den unbelasteten Kondensator umgebenden Luft
- **untere Grenztemperatur (ϑ_{min})**: niedrigste Temperatur an der kältesten Stelle der Oberfläche des Kondensators, bei der dieser betrieben werden darf
- **obere Grenztemperatur (ϑ_{max})**: höchste Temperatur an der wärmsten Stelle der Oberfläche des Kondensators, bei der dieser betrieben werden darf
- **Betriebstemperaturbereich ($\Delta\vartheta_B$)**: $\Delta\vartheta_B$ wird durch ϑ_{min} und ϑ_{max} begrenzt; in Ausnahmefällen darf die Betriebstemperatur auch außerhalb von $\Delta\vartheta_B$ liegen
- **Temperaturkoeffizient der Kennwerte (TK)¹⁾**: Alle physikalischen Kennwerte (z. B. $\epsilon, R_{Is}, I_R, \tan \delta_e$) und damit alle Kennwerte, die die Bauelementefunktion ausmachen (z. B. $Z, C_S, R_S, \tan \delta_s$), sind temperaturabhängig.

Tafel 2.26 Qualitative und quantitative Bewertung (Spitzenwerte) der wichtigsten diskreten Kondensatorenarten

Kenngröße	Einheit	Elektrolyt		
		Al flüssig	Ta flüssig	fest
C_N	μF	10^8	3600	1000
U_N	V	500	900	100
$\tan \delta$	% bei $f = 1 \text{ kHz}$	20 (50 Hz)	10 ... 30 (50 Hz)	6 ... 10
ϑ_B	$^{\circ}C$	-40 ... +85	-55 ... +200	-80 ... +125
Derating	U_B in % von U_N bei ϑ_T	50 (50 $^{\circ}C$)	30 (85 $^{\circ}C$)	30 (125 $^{\circ}C$)
Zeitkonstante τ	s			
I_R	μA	0,005 ... 0,05	< 0,0005 ... 0,02 μFV	
R_{Is}	M Ω			$4 \cdot 10^2$
E_D	10^4 V/cm	$(3 \dots 5,5) \cdot 10^2$		$10^{-3} \dots 10^{-1}$
q_N	$10^{-4} \text{ cm}^3/\mu C$	$10^{-3} \dots 10^{-1}$		
$C_N \cdot U_N$		sehr groß	sehr groß	groß
Temperaturverhalten		mäßig	mäßig	gut
Stabilität		mittel	sehr gut	sehr gut
Lebensdauer		gut	gut	gut
Lagerfähigkeit		mäßig	gut	sehr gut
leiterplattengerecht		ja	ja	ja
hybridgerecht		ja	nein	ja
Preis pro $C_N \cdot U_N$		niedrig	mittel ... hoch	mittel ... hoch

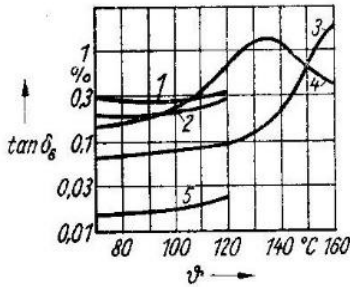


Bild 2.30 Dielektrischer Verlustfaktor verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur ($f = 50 \text{ Hz}$)
 1 Trichlordiphenyl; 2 Mineralöl;
 3 Polycarbonat; 4 Polyester; 5 Polypropylen

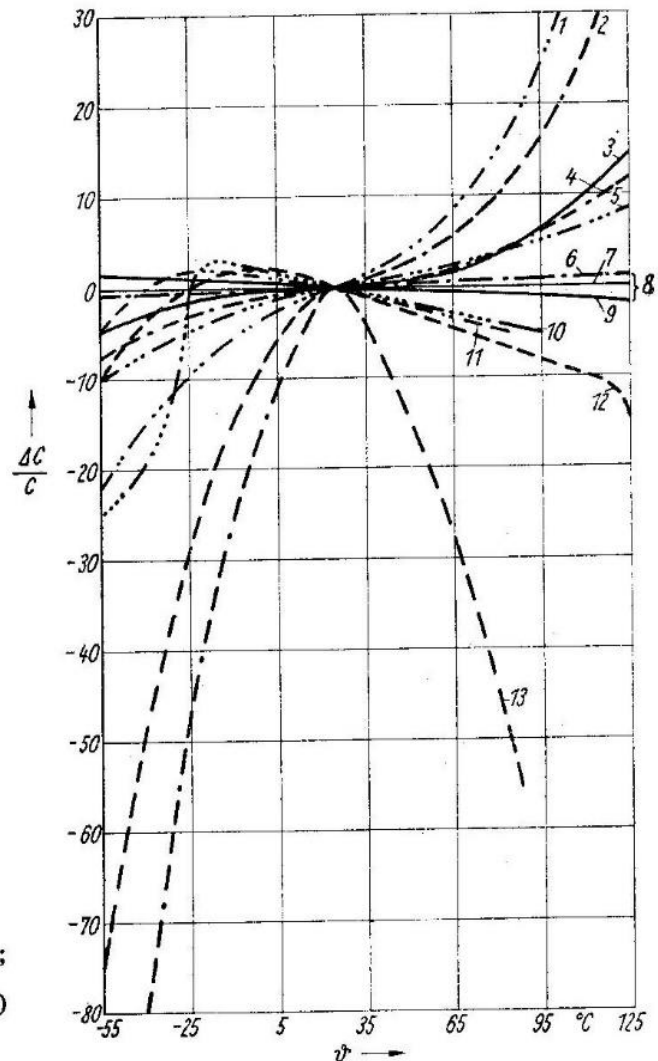


Bild 2.31 Relative Kapazitätsänderung von Kondensatoren in Abhängigkeit von der Temperatur
 1 Ta, flüssig; 2 Al, flüssig; 3 Mylar; 4 Ta, fest;
 5 Papier/Epoxidharz; 6 Glas/Emaille; 7 Klasse I (NDK); 8 Glimmer, andere Kunststoffe; 9 PTFE;
 10 Papier/Chlordiphenyl; 11 Papier/Wachs;
 12 Klasse II (MDK) $BaTiO_3$; 13 Klasse II (HDK) $BaTiO_3$

Polyester		Polycarbonat		Polypropylen		Keramik
KT	MKT	KC	MKC	KP	MKP	Scheibe/ Vielschicht
0,47	10	1	10	1	3,3	56
1000	400	400	400	2000	1000	10000
$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-3}$	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2
-40 ... +125	-60 ... +100	-55 ... +125	-55 ... +100	-40 ... +100	-55 ... +85	-60 ... +200
20 (100°C)	20 (100°C)	50 (125°C)	20 (100°C)	-	-	-
$10^3 \dots 10^5$		$10^3 \dots 10^5$		$10^3 \dots 10^5$		$10 \dots 10^4$
$5 \cdot 10^2 \dots 10^8$		$5 \cdot 10^2 \dots 10^8$		$5 \cdot 10^2 \dots 10^8$		$10^2 \dots 10^8$
		3 ... 60 $10^{-2} \dots 10$				0,2 ... 3 $10^{-2} \dots 10^2$
klein mittel		klein mittel		klein ... mittel mittel ... groß		klein ... mittel
sehr gut ... gut		sehr gut ... gut		sehr gut ... gut		gut ... mäßig
mittel		mittel		mittel		mittel
sehr gut		sehr gut		sehr gut		sehr gut
gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	mäßig ... gut
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
niedrig	mittel	niedrig	mittel	mittel	mittel	niedrig

Definition:

$$TK_A \equiv \alpha_A = \frac{1}{\bar{A}_0} \frac{\Delta \bar{A}}{\Delta \vartheta};$$

\bar{A}_0 Kennwert bei festgelegter Temperatur (ϑ_0), $\Delta \bar{A}$ \bar{A} -Änderung bei ϑ -Erhöhung von ϑ_0 auf ϑ_1 ($\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$)

Im **Bild 2.31** sind Richtwerte (im Sinne von Größtwerten) der Kapazitätsänderung im Betriebstemperaturbereich verschiedener Festkondensatorarten zusammengestellt.

- *Lager- und Transporttemperaturen*¹⁾: Die zulässigen Temperaturen werden vom Hersteller bzw. in Standards angegeben. Bei Nichteinhaltung ist mit einer Abnahme der Bauelementelebensdauer und -zuverlässigkeit gegenüber dem Garantiewert zu rechnen.

Bei der Auswahl von Kondensatoren für einen bestimmten Anwendungszweck muß man sich außer über die Funktion in der Schaltung und die äußeren Betriebsbedingungen auch über die applikativen Kennwertgrenzen Klarheit verschaffen. Dies geschieht am besten im Vergleich der verschiedenen Kondensatorarten (**Tafel 2.26**).

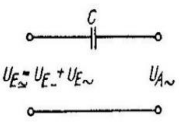
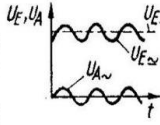
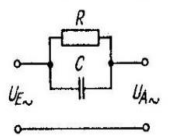
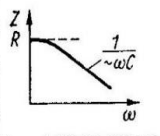
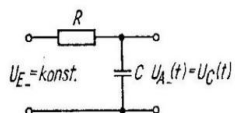
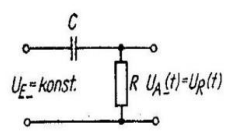
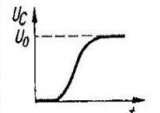
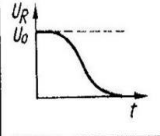
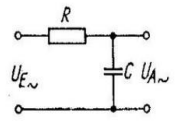
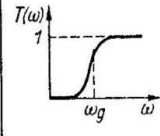
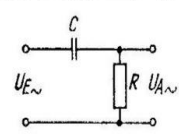
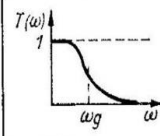
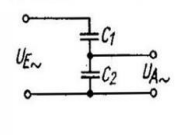
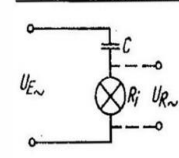
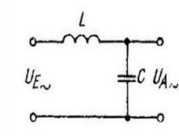
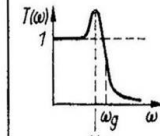
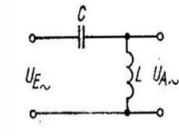
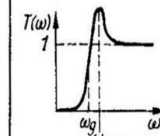
2.1.2.4 Anwendung von Kondensatoren

Die Applikation von Kondensatoren stützt sich auf folgende Aspekte:

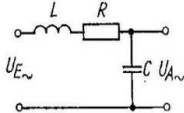
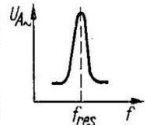
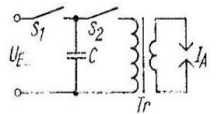
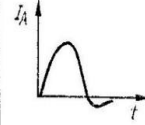
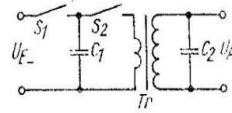
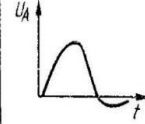
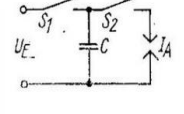
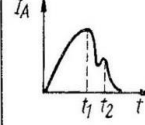
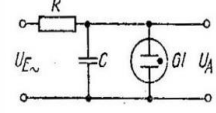
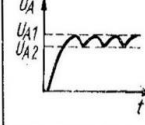
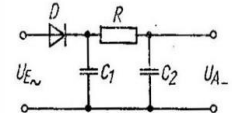
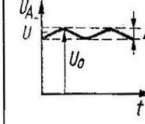
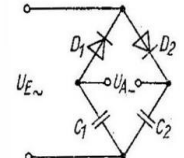
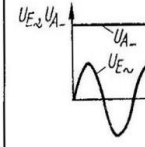
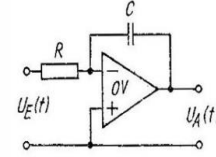
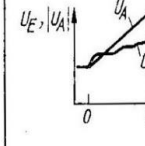
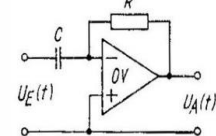
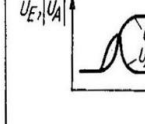
- schaltungstechnische Verwendung der Kapazität,
- Nutzung der Bauelementeparameter der Kondensatoren,
- Nutzung physikalisch-chemischer Eigenschaften von Bestandteilen der Kondensatorkonstruktion,
- funktionelle Verkopplung technologisch integrierter Kondensatoren.

Der praktische Einsatzfall vereinigt in der Regel mehrere dieser Aspekte; die Aufteilung ist jedoch für eine Übersicht nützlich. Die Grundschaltungsbeispiele in **Tafel 2.27** erläutern die große Bedeutung der schaltungstechnischen Verkopplung des Kondensators mit anderen Bauelementen, womit sich eine Vielfalt von Grundfunktionen bzw. Anwendungsbeispielen ergibt. (Die Schaltungen wurden auf die wesentlichen Elemente beschränkt, um die Bedeutung der Kapazität jeweils übersichtlich herausarbeiten zu können.) Soweit es sinnvoll er-

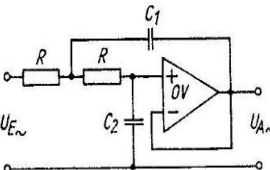
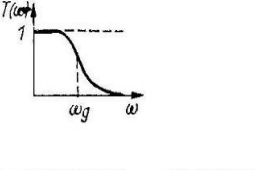
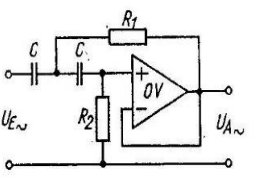
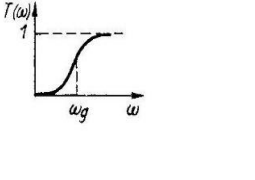
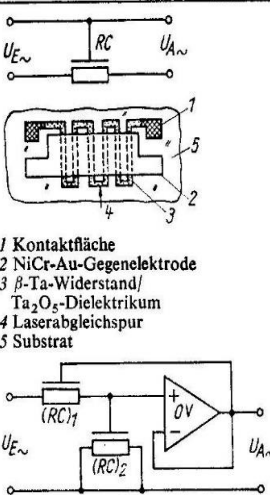
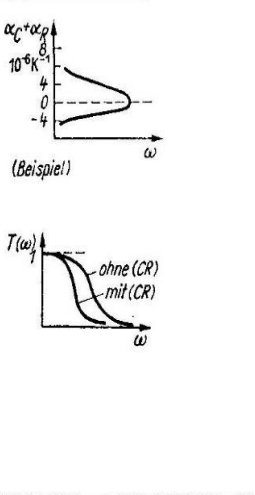
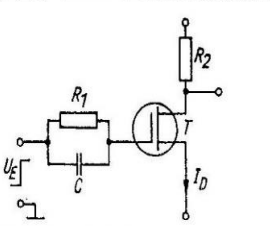
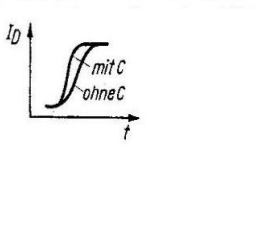
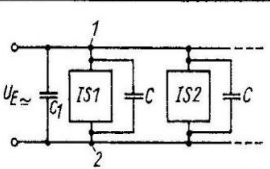
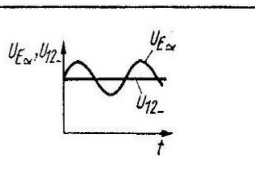
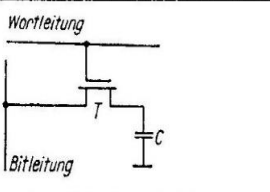
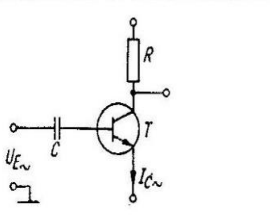
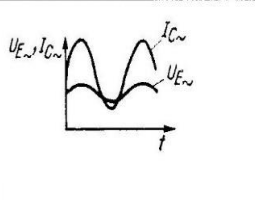
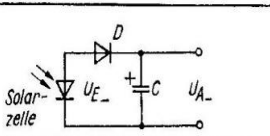
Tafel 2.27 Beispiele für Grundschaltungen mit Kondensatoren

Grundschaltung	quantitative bzw. qualitative Beschreibung			Bemerkung/ Anwendungsbeispiel
	Ansatz	Lösungsbeispiel	grafische Darstellung	
 <p>$U_{E\sim} = U_{E-} + U_{E\sim}$ $U_{A\sim}$</p>	$R_{I_1} \rightarrow \infty, \quad I_- = 0$			Gleichstrom- abblockung
	$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C$	$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		frequenzabhängige Impedanz
 <p>$U_{E-} = \text{konst.}$ $U_{A(t)} = U_C(t)$</p>  <p>$U_{E-} = \text{konst.}$ $U_{A(t)} = U_R(t)$</p>	$U_{E-} = U_0$ $\frac{dU_C(t)}{dt} + \frac{1}{RC} U_C(t) = \frac{U_0}{RC}$ $U_0 = U_R + U_C$	a) $U_C(t) = U_0 [1 - \exp(-t/RC)]$ b) $U_R(t) = U_0 \exp(-t/RC)$	 	zeitabhängige Steuerspannung
	$T(\omega) \equiv \left \frac{U_{A\sim}}{U_{E\sim}} \right $	a) $T(\omega) = \frac{\omega CR}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		a) RC-Hochpaßfilter
		b) $T(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}$		b) RC-Tiefpaßfilter
		$U_{A\sim} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{E\sim}$		verlustarme Spannungsteilung
	a) Einschwingvorgang $R_1 = R_1 [T(t)]$ $Z \frac{dI(t)}{dt} + I(t) \frac{dR_1}{dT} \frac{dT(t)}{dt}$ $= \frac{dU_E(t)}{dt}$ $Z = \frac{1 + j\omega CR_1}{j\omega C}$ $R_1(0) = R_0$ b) stationärer Betrieb $R_1 = R_1(T_0) \equiv R_T = \text{konst.}$ $U_{E\sim} = U_0 \exp(j\omega t)$	b) $U_{R\sim} = \frac{\omega CR_T}{\sqrt{1 + (\omega CR_T)^2}} U_{E\sim}$		verlustarmer Ballastwiderstand
		a) $T(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 CL}$		LC-Filter hoher Güte
		b) $T(\omega) = \frac{\omega^2 CL}{\omega^2 CL - 1}$		

Tafel 2.27 (Fortsetzung)

Grundsaltung	quantitative bzw. qualitative Beschreibung			Bemerkung/ Anwendungsbeispiel
	Ansatz	Lösungsbeispiel	grafische Darstellung	
	$U_{E\sim} = U_0 \exp(j\omega t)$ $\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{CL} I = U_{E\sim}$ $U_{A\sim} = \frac{I(t)}{\omega C}$	$I(t) = \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \times (A' \cos \omega_0 t + B' \sin \omega_0 t)$ <p>stationärer Zustand:</p> $= \arctan \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R}$ $+ \frac{U_0 \cos(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$ <p>Resonanz: $\omega L \approx \frac{1}{\omega C}$</p> $U_{A\sim} \approx \frac{U_0}{\omega CR} \gg U_0$		Resonanzspannungs- vervielfacher
				Stoßstromgenerator
				Stoßspannungs- generator
				Lichtbogengenerator (z.B. beim Perkussionsschweißen: t_1 Stromstärkepeak t_2 Fügeteilkontakt)
				Relaxationsgenerator
	Welligkeit: $\left \frac{\Delta U}{U_0}\right \rightarrow \text{klein}$			Spannungsglättung
	$U_{E\sim} = U_0 \cos \omega t$	$U_{A\sim} \approx 2U_0$		Gleichspannungs- generatoren: - Spannungs- verdoppler - Kaskaden- Spannungs- vervielfacher
	$ U_A(t) = \left \frac{1}{RC} \int_0^t U_E(t) dt \right $			Integrierer
	$ U_A(t) = \left CR \frac{dU_E}{dt} \right $			Differenzierer

Tafel 2.27 (Fortsetzung)

Grundschialtung	quantitative bzw. qualitative Beschreibung	Lösungsbeispiel	grafische Darstellung	Bemerkung/ Anwendungsbeispiel
	Ansatz	Lösungsbeispiel	grafische Darstellung	
	ω_g festgelegte Grenzfrequenz R frei wählbar k_1, k_2 Konstanten	$T(\omega) = \frac{1}{1 + 2P^* \omega_g C_2 R + P^{*2} \omega_g^2 C_1 C_2 R^2}$ $P^* = \frac{\omega}{\omega_g} \quad C_2 = \frac{k_1}{2\omega_g R}$ $C_1 = \frac{k_2}{\omega_g^2 C_2 R^2}$		integriertes aktives RC-Tiefpaßfilter (R-Abgleich sichert hohe Gütefaktoren)
	ω_g festgelegte Grenzfrequenz C frei wählbar k_1', k_2' Konstanten	$T(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega_g^2 P^* C R_2} + \frac{1}{\omega_g^2 P^{*2} C^2 R_1 R_2}}$ $R_2 = \frac{2}{k_1' \omega_g C}$ $R_1 = \frac{1}{k_2' \omega_g^2 C^2 R_2}$		integriertes aktives RC-Hochpaßfilter (R-Abgleich sichert hohe Gütefaktoren)
 <p>1 Kontaktfläche 2 NiCr-Au-Gegenelektrode 3 β-Ta-Widerstand/ Ta_2O_5-Dielektrikum 4 Laserabgleichspur 5 Substrat</p>	Z s. in Tafel 2.22 $\alpha_{CR} \equiv \frac{d(CR)}{CR dT}$ $= \frac{1}{C} \frac{dC}{dT} + \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ (TK des RC-Produktes)	$\alpha_{CR} = \alpha_C + \alpha_R \rightarrow 0$ mit $\alpha_C \approx -\alpha_R > 0$		aktives RC-Tiefpaßfilter mit verteilten RC-Parametern (Einstellbarkeit der Filterfrequenzbänder, geringe Abmessungen, mit „idealer“ Temperaturkompensation)
	$s, Z(\omega)$ und $U_C(t)$			„speed-up“-Transistorsteuerung (Verringerung der Signalfußverzögerung)
	$s, Z(\omega)$ und $U_C(t)$			Abblock- bzw. Stützkondensatoren
 <p>Wartleitung Bitleitung</p>	$s, U_C(t)$			dynamische Speicherzelle mit Speicherkondensator (z. B. 1-Mbit-Einchip-Speicher)
	$I_- = 0$ und $Z(\omega)$			Abblock- (bzw. Kopplungs-) Kondensator in Transistorschaltungen
	$s, U_C(t)$ und $W_e = \frac{1}{2} C U_C^2$			Pufferkondensator (extrem hohe Kapazitäten)

Tafel 2.28 Nutzbare physikalische Eigenschaften von Kondensatoren mit Anwendungsbeispielen

Eigenschaft/ Kenngröße	Formel- zeichen	Anwendungsgebiet (als Beispiel)	besonders betroffene moderne Erzeugnisse
Energie	$W_e = \frac{1}{2} CU^2$	Impulsenergie- generierung	Elektrolytkondensatoren für erhöhte Anforderungen, Leistungskondensatoren
Ladung	$Q = CU$	Spannungsversorgung	Doppelschicht-Kondensatoren, höchstkapazitive Elektrolyt- und Kunst- stoffkondensatoren (z. B. Pufferkonden- satoren für Speicher-IS oder Solarzellen)
Spannung	U	Informationsspeicherung	Kunststoffkondensatoren
Isolationswiderstand	$R_{Is} \rightarrow \infty$	Gleichstromabblockung	Keramik- und Kunststoffwickelkonden- satoren
frequenzabhängiger Scheinwiderstand	$Z_C = \frac{1}{\omega C}$	Frequenzfilter, Störspannungsschutz, Spannungsteiler	Elektrolyt-, Keramik- und Kunststoff- kondensatoren
dielektrische Verluste	$\tan \delta_e(f)$	dielektrische Heizung	kapazitive Mikrowellenanlagen (z. B. Lebensmittelaufbereitung)
Phasendrehung	$\varphi \approx \frac{\pi}{2}$	Blindleistungs- kompensation	Leistungskondensatoren mit Kombi- nationsdielektrikum, Elektrolytkondensatoren
Lade- und Entlade- strom	$I_C(t)$	Steuerung aktiver Bauelemente	integrierte Dünnschichtkondensatoren in monolithischer Technik
feldstärkeabhängige Ladung	$Q(E)$	Feldstärkemessung	Luftkondensatoren mit beweglicher Platte
ladungsabhängige Feldstärke	$E(Q)$	Ionensensor	MIS-Kondensatoren mit Elektrolytgate
vorzeichenbehaftete Feldstärke	$\pm E$	elektrostatische Strahl- ablenkung geladener Teilchen	spezielle Plattenkondensatoren (Vakuumpkondensatoren)
		Reinigung von Gas- bzw. Flüssigkeits- strömungen, Schichtabscheidung	Plattenkondensatoren mit Netzelektrode und Luft-, Gas- oder Flüssigkeits- dielektrikum
Gleichspannungs- Wechselspannungs- Überlagerung		Wechselspannungs- anwendung von Elektrolytkondensato- ren, Modulation	Elektrolyt- und Kunststoffkondensatoren (z. B. Rundfunk- und Fernsehtechnik)
feldstärkeabhängiges inneres Kraftfeld	$K(E)$	Hochspannungs- messung	Plattenkondensator mit kippbarer Hilfs- platte
		elektroakustische Wandlung (Lautsprecher)	Plattenkondensator mit metallisierter Membranelektrode
feldstärkeabhängige Polarisation des Dielektrikums	$P(E)$	Flüssigkristall- display	Plattenkondensator mit Flüssigkristall- dielektrikum und lichtdurchlässiger Elektrode
nichtdestruktiver Durchschlag	U_D	kapazitives Fest- körperdisplay	Plattenkondensator mit aktiver, licht- emittierender Halbleiterschicht im Di- elektrikum und lichtdurchlässiger Elektrode
frequenzabhängige Kapazität	$C(f)$	Frequenzfilterung	integrierte RC-Bauelemente in Ta- Dünnschichttechnik

Tafel 2.28 (Fortsetzung)

Eigenschaft/ Kenngröße	Formel- zeichen	Anwendungsgebiet (als Beispiel)	besonders betroffene moderne Erzeugnisse
spannungsabhängige Kapazität	$C(U)$	elektronische (kapa- zitive) Steuerung	Kapazitätsdioden in monolithischer Technik
temperaturabhängige Kapazität	$C(\theta)$	Temperatursensor, Temperaturkompens- ation	Keramikkondensatoren
geometrieabhängige Kapazität	$C\left(\frac{A}{d}\right)$	kapazitive Informations- abtastung, Verschleißsensor	Luftkondensator (z. B. VHD-Bildplatte mit gelochter Leit-PVC-Elektrode; Sensor mit Festelektrode und dem Ver- schleißteil als veränderlicher Elektrode)
flächenabhängige Kapazität	$C(A)$	Füllstandssensor	Luftkondensator mit Flüssigdielektrikum- teillfüllung
		elektronische Ab- stimmung	veränderliche Kondensatoren mit mechanischer C-Einstellung
Abhängigkeit der Kapazität vom Elektrodenabstand	$C(d)$	akustoelektrische Wandlung (Mikrofon), Drucksensor, Gleichspannungs- messung mit Wechsel- spannung	Kondensatoren mit metallisierter elastischer oder gummielastischer Mem- bran (Kunststoffolie, Gummifolie) bzw. mit Schwingelektrode (z. B. Luft- kondensator)
feuchteabhängige Kapazität	$C(\varphi_{rel})$	Feuchtesensor	Streifenkondensator mit feuchteempfind- lichem Dielektrikum, Dickschichtkondensator mit poröser Elektrode und porösem Dielektrikum
supraleitender Tunneleffekt		Josephsonbauelement	kapazitive Tunneloxid/Supraleitungs- elektrode-Strukturen (z. B. Nb-Oxid/Nb)
elektroakustische Kopplung		interdigitaler Kondensator	Kammkondensatoren mit Luft- und piezoelektrischem Substratdielektrikum (LiNbO_3)
		Schwingquarz	piezoelektrischer Quarzkondensator (metallisiert)
fotoelektrische Kopplung		FET-Bildwandler	MIS-Kondensatoren mit lichtempfind- licher Halbleiterplatte (z. B. CCD)
Ladungsgeneration durch energiereiche Strahlung		kapazitiver Strahlungssensor	MIS-Kondensator mit strahlungsempfind- licher Halbleiterelektrode
elektromagnetische Kopplung		Magnetfeldsensor	Kondensator mit elektrostriktivem Dielektrikum
integrierte Kopplung kapazitiver Strukturen		CCD-Schieberegister	MIS-Kondensatoren mit Ladungskopp- lung in monolithischer bzw. SiO_2 -Technik
technologische (räumliche) Inte- gration mit aktiven Bauelementen		Stapelkondensator als Speicherzelle im 1-Mbit- Einchipspeicher	Ta-Ta ₂ O ₅ -Dünnschichtkondensator

schien, wird die Grundfunktion durch Gleichungen oder grafische Darstellungen beschrieben, wobei es auch hier nur auf das Wesentliche ankommt.

Auf die Hauptkennwerte von Kondensatoren wurde in Abschnitt 2.1.2.3 und anderen Abschnitten des Taschenbuches (s. auch [2.26] bis [2.30] und [2.22]) eingegangen. Sie werden im Sinne der gegebenen Definitionen ebenso wie weitere Bauelementeparameter genutzt bzw. sie sind beim Betrieb der Kondensatoren zu beachten, vor allem wenn es sich nach Herstellerangaben bzw. Standards um Garantiewerte handelt. Wie aus **Tafel 2.28** hervorgeht, nutzt

Tafel 2.29 Schaltzeichen für Kondensatoren (im wesentlichen nach [2.31])

Kondensator	Schaltzeichen
Festkondensatoren	
allgemein	
mit Darstellung des Außenbelags	
Mehrfachkapazität, z. B. doppelt mit Schirmgehäuse	
- und Verbindung einer Elektrode mit dem Gehäuse	
- und mit Anschluß am Gehäuse	
untere Elektrode verbunden mit der Masse des Gerätes	
mit in Reihe geschaltetem Widerstand	
gepolter Kondensator	
Elektrolytkondensator	
- gepolt	
- ungepolt	
Durchführungskondensator	
Breitbandkondensator	
Störschutzkondensator	
veränderbare Kondensatoren	
allgemein	
allgemein, mit Kennzeichnung der beweglichen Elektrode (z. B. Rotor)	
mit stufenweiser Verstellung	
Mehrfachdrehkondensatoren (z. B. 2 Unterteilungen)	
Differentialkondensator (Anmerkung: $C_1 + C_2 = \text{konst.}$)	
Doppelstator-Drehkondensator (Anmerkung: bei jeder Stellung der beweglichen Elektrode ist $C_1 = C_2$)	
Trimmer, allgemein	

Tafel 2.29 (Fortsetzung)

Kondensator	Schaltzeichen
Trimmer, wenn bewegliche Elektrode gekennzeichnet werden soll	
zu Festkondensatoren und veränderbaren allgemein: Wenn bewegliche Elektrode, der Außenbelag oder die Elektrode mit einem niedrigen Potential behaftet ist, kann entsprechende Elektrode bogenförmig dargestellt werden.	
Varikond	
integriertes RC-Bauelement mit verteilten Parametern	
Schwingquarz	
Kapazitätsdiode (Varicap)	

man Kondensatoren – z. T. in erheblicher Abwandlung konventioneller Konstruktionen – zunehmend als funktionelle Einheiten, z. B. als Sensoren, die weit vom klassischen Konzept der reinen Ladungsspeicherung abweichen oder dies unter neuen Gesichtspunkten aufgreifen. Dabei setzt man praktisch alle denkbaren physikalischen Eigenschaften der Kondensatorbestandteile ein.

Die funktionelle Verkopplung technologisch integrierter Kondensatoren steht trotz jahrzehntelanger Nutzungserfahrungen, z. B. in der Schicht- und in der Halbleitertechnik, mit Blick auf die stürmische Entwicklung der Mikroelektronik erst am Anfang. Sie beschränkt sich aber nicht allein auf mikroelektronische Technologien, sondern betrifft alle Bereiche der Kondensatorapplikation einschl. der Hochleistungselektrotechnik, so z. B. die Unterbringung von Kondensatoren und anderen Bauelementen in einem gemeinsamen Gehäuse zur Realisierung einer speziellen funktionellen Einheit.

Schaltzeichen. Die gebräuchlichsten Schaltzeichen konventioneller Kondensatoren sind in Tafel 2.29 zusammengestellt. Dabei wurde vor allem auf [2.31] zurückgegriffen.

2.1.3 Induktivitäten und Gegeninduktivitäten

2.1.3.1 Allgemeines

Definition und Einheit

Selbstinduktivität: Proportionalitätsfaktor zwischen elektrischem Strom I und magnetischer Flußverkettung $\Psi = \sum_{v=1}^w \Phi_v$ eines Stromkreises (**Bild 2.32**); statisch $L = \Psi/I$, differentiell $L_d = d\Psi/dI = I dL/dI + L$ (**Bild 2.33**).

Für $\mu = \text{konst.}$ gilt $L = L_d$ (Luftspulen bzw. L für kleine Felder).

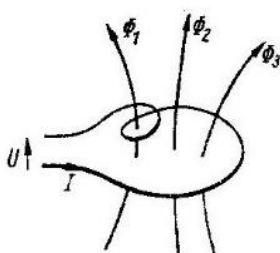


Bild 2.32 Magnetische Flußverkettung eines Stromkreises
 $\Psi = 2\phi_1 + \phi_2 + \phi_3$

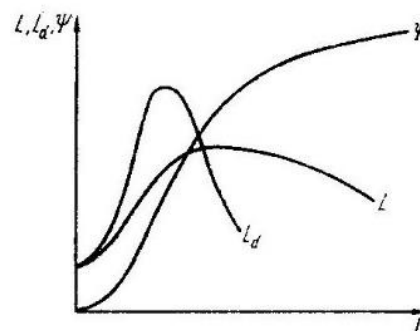


Bild 2.33 Statische (L) und differentielle (L_d) Induktivität

Literatur

Abschnitt 2.1

- [2.1] *Weißmantel, C.; Hamann, C.*: Grundlagen der Festkörperphysik. Berlin: Dt. Verl. d. Wiss., 1981, Abschnitt 6.5
- [2.2] *Kittel, C.*: Einführung in die Festkörperphysik. 6. Aufl. München: Oldenbourg, 1983
- [2.3] *Greig, D.*: Elektronen in Metallen und Halbleitern. Berlin: Akademie-Verl., 1971, Abschn. 7 bis 9
- [2.4] *Maissel, L.*: Electrical properties of metallic thin films. In: Handbook of thin film technology. New York: McGraw-Hill, 1970
- [2.5] *Chopra, K.L.*: Thin film phenomena. New York: McGraw-Hill, 1970
- [2.6] *Berry, R.W.; Hall, P.M.; Harris, M.T.*: Thin film technology. Princeton, N.J.: Van Nostrand, 1968
- [2.7] *Ondracek, G.; Schulz, B.*: Zur Leitfähigkeit von Cermets und anderen mehrphasigen Werkstoffen. Ber. Dt. Keram. Ges. 48 (1971) 10, S.427-434; 12, S.525-528
- [2.8] *Gerritsen, A.N.*: Metallic conductivity, experimental part. In: Handbuch der Physik. Hrsg. S. Flügge. Bd. XIX. Berlin: Springer, 1956
- [2.9] *Kirby, P.L.*: The non-linearity of fixed resistors. Electronic Engng. 37 (1965) 453, S.722-726
- [2.10] *Nögel, O.*: Klirren, Rauschen und Spannungskoeffizient von Schichtwiderständen. Radio Mentor 2 (1970), S.108-112
- [2.11] *Nyquist, H.*: Thermal agitation of electric charge in conductors. Phys. Rev. 32 (1928) S. 110
- [2.12] *Lunze, K.*: Belastungsrauschen von Kohleschichtwiderständen. Wiss. Z. Tech. Hochsch. Dresden 3 (1953/54) 5, S.711-726
- [2.13] *Hettich, A.*: Geometrische Dimensionen und Widerstandsrauschen. Frequenz 4 (1950) S.14
- [2.14] *Doering, K.*: Das Stromrauschen von Kohleschichtwiderständen. Funk u. Ton (1954) 8, S.378-385, 422-429
- [2.15] *Bell, D.A.*: Electrical noise. London: Van Nostrand, 1960
- [2.16] *Gawrilov, G.G.*: Chemische (stromlose) Vernickelung. Saugau, Württ.: Leuze, 1973
- [2.17] DWP 99251 Verfahren zur Herstellung von Schichtwiderständen
- [2.18] *Maissel, L.*: Thin film resistors. In: Handbook of thin film technology. New York: McGraw-Hill, 1970
- [2.19] Wertekatalog Dünne Schichten. Tech. Hochsch. Karl-Marx-Stadt, 1975
- [2.20] *Middleton, A.E.; Herczycz, A.; Packer, H.*: Ultrahigh temperature oxide film fixed resistors. Proc. Electron. Comp. Conf., Washington, 1957, S.154
- [2.21] *Ansell, P.M.*: Conduction process in thick film resistors. Electrocomponent Sci. and Technol. (1976) 3, S.131-151
- [2.22] *Langer, H.-D.*: Festkörperelektrolytkondensatoren. Berlin: Akademie-Verl., 1982
- [2.23] *Döring, H.-U.; Langer, H.-D.*: Mehrdimensionale Behandlung der Bauelementefunktion von Elektrolytkondensatoren mit poröser Anode. Nachrichtentech., Elektron. 33 (1983) 4, S.168-171
- [2.24] IEC-Publ. 62, 2. Ausg., 1968
- [2.25] Erg. z. IEC-Publ. 62, 1. Ausg., 1968
- [2.26] *Höft, H.*: Passive elektronische Bauelemente. Berlin: Verl. Technik, 1977
- [2.27] *Zinke, O.; Seither, H.*: Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1982
- [2.28] *Liebscher, F.; Held, W.*: Kondensatoren. Dielektrikum, Bemessung, Anwendung. Berlin: Springer, 1968
- [2.29] *Harper, C.A.* (Hrsg.): Handbook of materials and processes for electronics. New York: McGraw-Hill, 1970
- [2.30] *Langer, H.-D.* (Hrsg.): Berichtsbände 1. bis 3. Tag. Kondensatoren, Karl-Marx-Stadt, 1981, 1983, 1985
- [2.31] TGL 16009 Ausg. 2.81 Schaltzeichen für Kondensatoren (entspr. ST RGW 864-78)
- [2.32] *Feldtkeller, R.*: Theorie der Spulen und Übertrager. 5. Aufl. Stuttgart: Hirzel, 1971
- [2.33] *Feldtkeller, R.*: Tabellen und Kurven zur Berechnung von Spulen und Übertragern. 3. Aufl. Stuttgart: Hirzel, 1958

Weiterführende Literatur

- Höft, H.*: Passive elektronische Bauelemente. Berlin: Verl. Technik, 1977
- Grundlagen passiver elektronischer Bauelemente. Leipzig: Dt. Verl. f. Grundstoffind., 1973
- Dummer, G.W.A.*: Fixed resistors. London, 1956
- Finke, K.-H.*: Bauteile der Unterhaltungselektronik. 3. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1986
- Induktivitäten, Impulstransformatoren und Schwingkreise. München: Thomson, 1971
- Küpfmüller, K.*: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 11. Aufl. Berlin: Springer, 1983
- Lunze, K.*: Einführung in die Elektrotechnik. 10. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1984
- Philippow, E.*: Grundlagen der Elektrotechnik. 7. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1984
- Pribisch, K.; Haslinger*: Bauelemente Nachrichtentechnik. 7. Aufl. Heidelberg: Bohmann, 1974
- Zinke, O.; Brunswig, H.*: Lehrbuch der Hochfrequenztechnik. 2. Aufl. Bd.1. Berlin: Springer, 1973