

# Funktion und Einsatz von Elektrolytkondensatoren

Teil 2 und Schluß

Dr. sc. nat. HANS-DIETER LANGER  
und Dipl.-Ing. KLAUS SCHURICHT

## Einsatz als Energiespeicher

Elektrolytkondensatoren sind auf Grund ihres geringen spezifischen Volumens und der erreichbaren hohen Spannungsfestigkeit sehr gut als Kurzzeitspeicher für elektrische Energie geeignet. Ein Beispiel dafür ist das im Bild 13 dargestellte Prinzipschaltbild für das Kondensatorimpulsschweißen (weitere Beispiele s. in [8]).

Über den Schutzwiderstand  $R_1$  und die Primärwicklung des Transformators  $Tr_1$  wird der Speicherkondensator  $C_1$  auf die Betriebsspannung  $+U_B$  aufgeladen. Durch Zünden des Thyristors  $Th_1$  erfolgt eine impulsartige Entladung des Speicherkondensators über die Primärwicklung des Transformators, wobei hohe Ströme auftreten, die nach Transformation mit entsprechend kleinem Übersetzungsverhältnis auf der Sekundärseite die zum Schweißen geforderte sehr hohe Stromstärke im kA-Bereich gewährleisten.

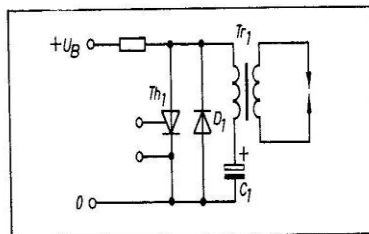


Bild 13: Prinzipschaltbild des Kondensator-Impulsschweißens

Gemäß dem Energiespeichervermögen der Kapazität  $C_1$  kann eine genau dosierte elektrische Energie  $W_{el}$  vorgegeben werden.

$$W_{el} = \frac{U_b^2 C_1}{2} \quad (17)$$

Die Diode  $D_1$  übernimmt beim Umschwingen des aus  $C_1$  und der Transformatorinduktivität gebildeten Schwingkreises den

primären Entladestrom und sichert damit ein vollständiges Entladen und eine bessere Nutzung des Energiespeichervermögens von  $C_1$ . Durch das Auftreten hoher Impulsströme sind für diese Anwendung ebenfalls kleine Werte für  $R_s$  und  $L_s$  gefordert, so daß Al-Elektrolytkondensatoren des Typs IB verwendet werden müssen.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz des Elektrolytkondensators als Energiespeicher zeigt Bild 14. Auch bei diesem Prinzip wird der Speicherkondensator  $C_1$  über den Schutzwiderstand  $R_1$  auf  $+U_B$  aufgeladen. Zum Zündzeitpunkt wird der Taster  $S_1$  geschlossen und die in  $C_1$  gespeicherte Ladung, durch  $Tr_1$  hochtransformiert, der Zündelektrode der Blitzröhre  $R_0$  zugeführt. Das führt zu einer impulsartigen Ionisation der Gasfüllung der Röhre und damit zum Durchzünden. Dadurch wird  $C_1$  in einem Zeitraum von etwa 0,1...10 ms entladen, wobei Stromstärkespitzen  $> 100$  A auftreten. Für die Auswahl des Kondensators  $C_1$

gelten daher auch alle im vorherigen Beispiel gemachten Aussagen.

Ein wichtiges Kriterium für Blitzelektrolytkondensatoren ist die Gewährleistung einer hohen spezifischen Ladung  $Q_v$  ( $Q_v$  in „As cm<sup>-3</sup>“), d. h. große Kapazität und hohe Nennspannung bei geringem Volumen. Durch Einsatz höchstaufgerauhter Anodenfolien sowie durch Verwendung der Doppelanodentechnik [6] konnte in letzter Zeit erreicht werden, daß moderne Blitzelektrolytkondensatoren nur noch 30% des Volumens gegenüber vergleichbaren Typen aus den 60er Jahren aufweisen. Die genannte Doppelanodentechnik ist dadurch gekennzeichnet, daß statt einer Folie zwei aufeinanderliegende, parallelgeschaltete Anodenfolien eingesetzt werden. Diese sind so stark geätzt, daß die gegenüberliegenden Ätzporen jeder einzelnen Folie durchgehende Kanäle bilden. Mit dieser Technik wird zwar das Wickelvolumen um das Volumen der zweiten Anodenfolie geringfügig erhöht, gleichzeitig aber die Kapazität etwa verdoppelt.

Elektrolytkondensatoren erweisen sich für den Einsatz als Blitzkondensatoren als besonders günstig, da auf Grund der Beträge der Reiheninduktivität  $L_s$  und des Reihenwiderstandes  $R_s$  eine im Vergleich zu Papierkondensatoren etwa dreifache Blitzdauer erreicht wird. Diese längere Blitzdauer wirkt sich besonders bei der Belichtung von Farbfilmmaterial günstig aus. Dabei wird der Einfluß des sog. Schwarzschild-Effektes gemindert, der auf den Trägheitseigenschaften des Filmmaterials beruht.

Ein ähnlicher Einsatzfall liegt auch bei Stroboskopen vor. Auch hier lassen sich Elektrolytkondensatoren bei nicht zu hohen Forderungen an die Blitzfolgefrequenz vorteilhaft einsetzen.

Eine neuartige Anwendungsrichtung zur Energiespeicherung mit Elektrolytkondensatoren ergibt sich nach [9] in der Computertechnik. Es sind bereits Einsatzfälle bekannt, bei denen Kondensatoren mit sehr hoher Kapazität und relativ niedriger Nennspannung ( $C_N = 100$  F;  $U_N = 1,5$  V) zur Stützung der Versorgungsspannung von Rechnerbaugruppen, insbesondere Speichereinheiten, verwendet werden. Dabei wird erreicht, daß der Speicherinhalt bei kurzzeitigem Netzausfall erhalten bleibt.

#### Einsatz für Informationsspeicherung

In der Elektronik werden Informationen häufig in Form von Spannungs- bzw. Stromwerten sowie in Form von Zeitintervallen verschlüsselt. Letzteres Verfahren führt u. a. zu der großen Gruppe der Zeitglieder in ihren vielfältigen Schaltungskonfigurationen. Elektrolytkondensatoren sind bei nicht zu hohen Ansprüchen an die Zeitgenauigkeit vor allem durch ihre hohe spezifische Kapazität zum Einsatz in Langzeitgliedern ohne Umpolung der Kondensatorspannung verwendbar.

Bild 15 zeigt das Prinzip eines Zeitgebers mit Elektrolytkondensator. Nach Öffnen des Schalters  $S_1$  wird der Kondensator  $C_1$  über die Konstantstromquelle  $I_{\text{konst.}}$  zeitlinear geladen. Bei Erreichen der Triggerschwelle gibt der Trigger ein Signal an das Relaisbaustein ab, das extern weiterverarbeitet werden kann. Ein erneutes Schließen von  $S_1$  führt die Schaltung in ihren Aus-

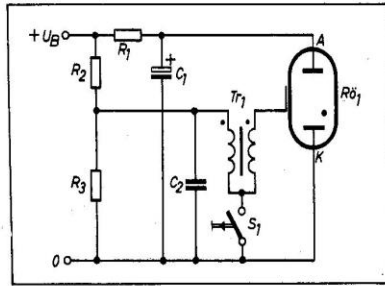


Bild 14: Prinzipschaltbild Elektronenblitzgerät

gangszustand zurück, wobei der Kondensator  $C_1$  über  $R_1$  wieder entladen wird. Die Verzögerungszeit bis zum Schalten des Relais ergibt sich bei vorgegebener Triggerschwelspannung  $U_{\text{Schw.}}$  zu

$$t = \frac{C_1 U_{\text{Schw.}}}{I_{\text{konst.}}} \quad (18)$$

Sehr wichtig für den Einsatz von Elektrolytkondensatoren in Zeitgliedern ist ein möglichst kleiner Reststrom. Während nach längerer spannungsloser Lagerung im Normalfall in den ersten Minuten des Einschaltens der Reststrom deutlich höher liegt, müssen Elektrolytkondensatoren für Zeitglieder bereits nach Sekunden konstante Reststromwerte aufweisen. Diese nicht einfach zu realisierende Forderung wird am besten durch den Einsatz von Tantalelektrolytkondensatoren erfüllt. Tantalkondensatoren mit flüssigem Elektrolyt sind in dieser Beziehung auf Grund der höheren Stabilität und Korrosionsbeständigkeit des Oxid-dielektrikums ebenfalls noch den Al-Kondensatoren mit flüssigem Elektrolyt überlegen.

Eine Speicherung von Informationen in Form von Spannungswerten kann mit einem Spitzenspannungsspeicher (Bild 16) erfolgen. Die Eingangsspannung mit beliebigem Zeitverlauf wird entsprechend dem Widerstandsverhältnis  $R_2/R_1$  im Verstärker  $V_1$  verstärkt, wobei nur der positive Anteil der Spannung infolge der Gleichrichterwirkung von  $D_1$  auf den Kondensator  $C_1$  gelangt. Der Einfluß der Schleusenspannung von  $D_1$  wird durch die hohe Leerlaufverstärkung von  $V_1$  fast vollständig eliminiert. Durch die Sperrwirkung von  $D_1$  bildet sich an  $C_1$  die Spannung

$$U_{C_1} = U_{\text{max}} \frac{R_2}{R_1}$$

aus. Entladen kann sich  $C_1$  nur über den Sperrwiderstand von  $D_1$  und den Eingangswiderstand von  $V_2$ , die beide sehr große Werte besitzen. Eine Löschung der Spannungsinformation kann durch Betätigen der Taste  $S_1$  erfolgen.

Eine andere Schaltungsvariante zur Speicherung von Spannungswerten stellt der Momentanwertspeicher (sample and hold) dar, dessen Schaltung Bild 17 zeigt. Durch Schließen des Schalters  $S_1$  zum Zeitpunkt  $t_1$  gelangt die am Eingang liegende Momentanspannung  $U_{\text{in}}$  an den invertierenden Eingang des Verstärkers  $V_1$  und wird in diesem entsprechend dem Verhältnis  $R_2/R_1$  verstärkt. Dabei wird der Kondensator  $C_1$  mit dieser verstärkten Spannung auf den Wert  $-U_{\text{in}}$  aufgeladen. Bei anschließendem Öffnen des Schalters  $S_1$  bleibt die aufgegräppte Ladung in  $C_1$  enthalten und verändert erst ihren Wert bei erneutem Schlie-

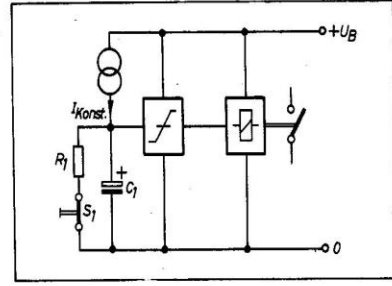


Bild 15: Prinzipschaltbild eines Zeitgebers ohne Spannungsumpolung

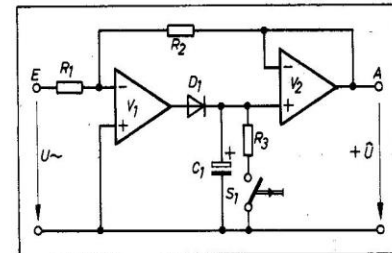


Bild 16: Prinzipschaltbild Spitzenspannungsspeicher

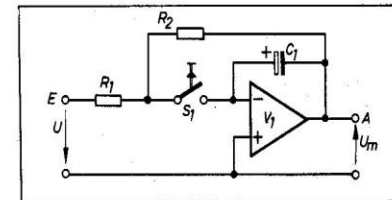


Bild 17: Prinzipschaltbild Momentanwertspeicher

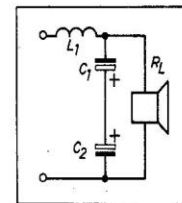


Bild 18: Schaltbild Frequenzweiche für Lautsprecher (Tiefpaß zweiter Ordnung)

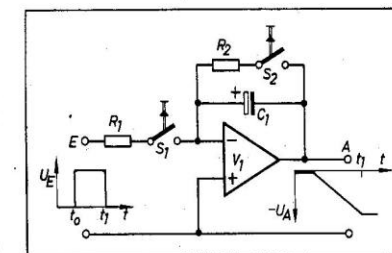


Bild 19: Prinzipschaltbild eines Integrators mit Festlegung der Integrationsgrenzen

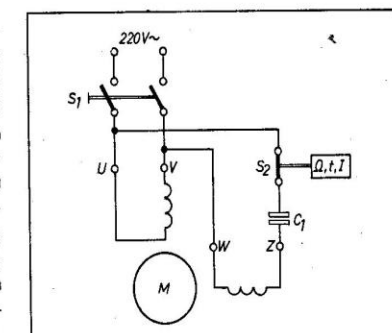


Bild 20: Prinzipschaltbild einer Anlaßschaltung für Einphasen-Induktionsmotor

Ben von  $S_1$  unter der Voraussetzung eines zu diesem Zeitpunkt veränderten Momentanwertes der Eingangsspannung  $U$ . Der Einsatz von Elektrolytkondensatoren in Baugruppen zur Informationsspeicherung stellt beim gegenwärtigen Stand der Technik einen Applikationsgrenzfall für diese Bauelemente dar. Man wird diese Lösung nur bei Forderungen nach sehr hohen Speicherzeitkonstanten verwenden. Hierbei ist ebenso wie bei Zeitgliedern die Forderung nach sehr geringem Reststrom zu beachten (Einsatz von Tantalfestelektrolytkondensatoren).

### Einsatz als Koppellement

In diskret aufgebauten Transistor-NF-Verstärkern werden Elektrolytkondensatoren zur Stufenkopplung eingesetzt. Die Kondensatoren haben dabei generell die Aufgabe, Schaltungspunkte mit gleichspannungsmäßig unterschiedlichem Potential wechsellspannungsmäßig zu verbinden (s. Bild 12 im Teil 1).

Die Koppelkondensatoren  $C_1$ ,  $C_3$  und  $C_6$  im Bild 12 dienen der Kopplung der einzelnen Verstärkerstufen in Signalflußrichtung, während der Kondensator  $C_2$  zur Abtrennung der Gleichspannungen im Gegenkopplungs-zweig dient. Die Koppelkondensatoren werden wie folgt dimensioniert [3]:

$$C \approx \frac{K}{\omega_u (R_i + R_{ein})} \quad (19)$$

$\omega_u = 3\text{-dB-Grenzfrequenz}$

Dabei stellt  $K$  wieder einen von der Zahl der frequenzbeeinflussenden Schaltelemente abhängigen Faktor dar, während  $R_i$  den Innenwiderstand der jeweiligen Vorstufe und  $R_{ein}$  den Eingangswiderstand der Folgestufe darstellen.

Für den Kondensator im Gegenkopplungs-zweig  $C_2$  besteht die Forderung [3]

$$C_2 \geq \frac{3}{\omega_u R_2} \quad (20)$$

### Einsatz in Frequenzfiltern

Für die Anwendung bei extrem niedrigen Frequenzen lassen sich mit Elektrolytkondensatoren vorteilhaft passive Filterschaltungen aufbauen. Außer Filtern erster Ordnung lassen sich prinzipiell auch Filter höherer Ordnung realisieren. Beispiele für einfache Filterschaltungen stellen die RC-Siebschaltung (Filter 1. Ordnung) im Bild 7a und die LC-Siebschaltung (Filter 2. Ordnung) im Bild 7b dar.

Der Wert des Kondensators  $C_1$  ergibt sich mit Hilfe der Dimensionierungsgleichungen [3]

für Filter erster Ordnung

$$C = \frac{1}{\omega_g R} \quad (21)$$

bzw. für Filter zweiter Ordnung

$$C = \frac{1}{\omega_g^2 L} \quad (22)$$

wobei  $\omega_g$  die Grenzfrequenz, d. h. die Kreisfrequenz, darstellt, bei der die Übertragungsfunktion  $U_{w2}/U_{w1}$  einen Abfall von 3 dB aufweist.

Ein wichtiges, bei dieser Anwendung von Elektrolytkondensatoren zu beachtendes Kriterium stellt die Amplitude der zu verarbeitenden Wechsellspannung dar. Es muß gewährleistet sein, daß der Spitzenwert von  $U_{w2}$  (nach Bild 7) zu keinem Zeitpunkt den Grenzwert der zulässigen Umpolspannung des Kondensators überschreitet, die für Al-Kondensatoren mit etwa 2 V und für Tantalkondensatoren im allgemeinen mit  $\leq 1$  V angegeben wird. (Neuere Bauelemententwicklungen bei Festelektrolytkondensatoren lassen jedoch bereits höhere Umpolspannungen zu [5].)

Erreicht die Wechsellspannungsamplitude höhere Werte, so müssen, wie im Bild 18 gezeigt, zwei Kondensatoren antiseriell zusammengeschaltet werden, wobei sich als resultierende Kapazität allerdings nur noch der Wert

$$C_{res} = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

ergibt.

Das im Bild 18 dargestellte Beispiel einer Tonfrequenzweiche für Tieftonlautsprecher dokumentiert ein relativ neues Einsatzgebiet für Elektrolytkondensatoren. Die Dimensionierung erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$C_{res} = \frac{1}{\omega_g R_L} \quad (23)$$

$$L_1 = \frac{1.6 R_L}{\omega_g} \quad (24)$$

Für Elektrolytkondensatoren in Tonfrequenzweichen werden entsprechend niedrige Werte des Reihenwiderstandes  $R_s$  verlangt, um bei den heute mit Transistorleistungsverstärkern zu erreichenden hohen Ausgangsströmen niedrige Verluste und damit

geringe Eigenerwärmung des Kondensators zu gewährleisten. Diese Forderung ist über den gesamten Tonfrequenzbereich zu erfüllen.

Eine weitere wichtige Forderung sind kleine zeitliche Toleranzen der Wechsellspannungskapazität. Nach [6] wird für die Auslieferungstoleranz bei Al-Elektrolytkondensatoren z. Z. international ein Wert von  $\pm 10\%$  und bei Tantalfestelektrolytkondensatoren der Wert von  $\pm 5\%$  erreicht. Ursprünglich wurden für Tonfrequenz ungepolte (bipolare) Elektrolytkondensatoren mit glatten Folien (niedrige Verluste) eingesetzt. Später wurde erkannt, daß die gepolte Kombination einer schwach aufgerauhten Anodenfolie (Aufrauhfaktor  $\approx 2$ ) mit einer hochaufgerauhten Katode im Wickel ebenfalls hohe Wechselströme auch ohne überlagerte Gleichspannung aushält. Derartige Tonfrequenzelektrolytkondensatoren werden im allgemeinen für Nennwechsellspannungen bis 35 V gefertigt. In jüngster Zeit ergibt sich wieder ein Trend zu ungepolten Typen mit stärker aufgerauhter Anodenfolie, der bei geeigneten Folien, Papieren und Elektrolyten zu wesentlich kleineren, zuverlässigeren und preisgünstigeren Kondensatoren führt.

Einen Grenzfall zwischen Filterschaltungen und Informationsspeicherschaltungen stellen Analogrechenglieder dar. Am Beispiel eines Langzeitintegrators (Bild 19) ergibt sich eine weitere Einsatzmöglichkeit für Elektrolytkondensatoren. Die Schaltung hat folgende Funktion:

Wird nach Anlegen einer positiven Eingangsspannung der Schalter  $S_1$  zum Zeitpunkt  $t_0$  geschlossen, so arbeitet die Schaltung als Integrator mit der Übertragungsfunktion

$$-U_a = \frac{1}{R_1 C_1} \int_{t_0}^{t_1} U_e dt \quad (25)$$

Wird zum Zeitpunkt  $t_1$  der Schalter  $S_1$  wieder geöffnet, so endet der Integrationsvorgang, und der Endwert der Ladespannung  $U_A$  bleibt in  $C_1$  gespeichert. Erst nach Entladen von  $C_1$  über den Löschscharter  $S_2$  befindet sich die Schaltung wieder im Ausgangszustand. In der Zeit zwischen dem Öffnen des Schalters  $S_1$  (bei  $t_1$ ) und dem Schließen des Löschscharter  $S_2$  arbeitet die Schaltung als Speicher und gestattet die Auswertung des Endwertes der Rampenfunktion  $U_a(t)$  über mehrere Sekunden.

Auch, für den Integrationskondensator be-

Tafel 2: Anforderungen an die Parameter von Elektrolytkondensatoren in verschiedenen Einsatzfällen

Anwendungsfall	Kapazität	Nennspannung	überlagerte Wechselspannung	Isolationswiderstand	Schaltfestigkeit	Impedanz	Reihenwiderstand	Induktivität	Frequenzbereich	Konstanz
Glättungskondensatoren	100 $\mu$ F...100 mF	3...100 V	1...10 V	mittel	gering	gering	$R_s \leq \frac{2,69}{\omega C}$	$L_c < 15 \text{ ms } R_s$	50...500 Hz	gering
Serienstabilisator	100 $\mu$ F...100 mF	16...450 V	0... 1 V	mittel	sehr groß	sehr gering	$R_s \leq \frac{\Delta U_{St}}{0,4 I_L}$	$L_c < \frac{t_{aus} R_s}{2}$	50 Hz... 100 kHz	gering
Energiespeicher	500 $\mu$ F...5 mF	100...500 V	—	hoch	groß	sehr gering	1...5 m $\Omega$	sehr gering	groß	mittel
Zeitgeberkondensatoren	10...1 000 $\mu$ F	10... 63 V	—	sehr hoch	groß	mittel	mittel	mittel	klein	sehr groß
Spannungsspeicher	1...100 $\mu$ F	10... 63 V	—	sehr hoch	groß	gering	klein	klein	groß	groß
Koppelkondensatoren	1 $\mu$ F...5 mF	3... 63 V	0...10 V	hoch	gering	gering	klein	klein	10 Hz... 1 MHz	mittel
Filterkondensatoren	10 $\mu$ F...10 mF	3... 10 V	0... 2 V	hoch	gering	sehr gering	klein	klein	10 Hz...100 kHz	groß
Kondensatoren in Baugruppen für Analogrechner	10...100 $\mu$ F	10... 40 V	—	sehr hoch	mittel	mittel	mittel	klein	groß	sehr groß
Phasenschieber	10...500 $\mu$ F	bis 320 V	220 V	hoch	gering	sehr gering	sehr klein	klein	50...500 Hz	gering

stehen Forderungen nach sehr hohen Sperrwiderständen, d.h. kleinen Restströmen, so daß hier prinzipiell Tantalelektrolytkondensatoren von Vorteil sind.

#### Einsatz als Phasenschieber

Phasenschieber mit Kondensatoren werden u. a. zur Erzeugung einer Hilfsphase beim Anlassen von Einphasen-Induktionsmotoren verwendet. Üblicherweise werden zu diesem Zweck MP-Kondensatoren eingesetzt. Es ist jedoch auch möglich, die hohe spezifische Kapazität des Elektrolytkondensators zu nutzen und durch Einsatz von bipolar geschalteten Bauelementen Wechselspannungsbelastungen zuzulassen. Die zulässige Einschaltdauer beträgt dabei etwa 3 s bei 20 Schaltvorgängen je Stunde [6].

Bild 20 zeigt eine derartige Anlaßschaltung. Solange  $S_2$  geschlossen ist, wird durch den in der Anlaufwicklung und dem Anlaßkondensator  $C_1$  fließenden Strom ein zum Hauptstromkreis phasenverschobenes Magnetfeld erzeugt, das den Motoranlauf gewährleistet. Da die zulässige Einschaltdauer von  $C_1$  gering ist, wird durch einen Fliehkraftschalter bei Erreichen der Nenn-drehzahl ( $\omega$ ), durch ein Zeitglied ( $t$ ) oder

durch die Kontrolle der Stromaufnahme (I) im Hauptstromkreis das Ausschalten von  $S_2$  bewirkt.

Die Einschaltdauer ist in jedem Fall zu begrenzen, damit sich die nach Gl. (11) zu ermittelnde Temperaturerhöhung des Kondensators in zulässigen Grenzen hält. Daraus resultierend ergibt sich auch für Motoranlaßkondensatoren die Forderung nach einem geringen Reihenwiderstand  $R_s$ . Die zulässigen Effektivstrombelastbarkeiten sind zu beachten [4] [5].

Für einen Einsatz als Motorbetriebskondensator, d.h. Einschaltdauer  $t \rightarrow \infty$ , sind Elektrolytkondensatoren nur bei Betriebs-spannungen  $U_{\sim} \leq 50$  V geeignet, da bei größeren Spannungen eine zu große Wärmeentwicklung im Kondensator auftritt. Bei der Entwicklung von elektronischen Schaltungen ist es unerlässlich, die nicht idealen Parameter der Elektrolytkondensatoren zu berücksichtigen und aus der Vielzahl der von der Bauelementeindustrie angebotenen Varianten die richtigen Typen auszuwählen.

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Einsatzfälle sind in Tafel 2 die hauptsächlichsten

Forderungen an die Bauelementeparameter zusammengefaßt und bewertet.

#### Literatur

- [1] Langer, H.-D.: Festkörperelektrolytkondensatoren. Berlin: Akademie-Verlag, in Vorbereitung
- [2] Taeger, W.: Halbleiterdioden. Berlin: Verlag Radio-Foto-Kinotechnik 1951
- [3] Schröder, H.: Elektrische Nachrichtentechnik Bd. II. Berlin: Verlag Radio-Foto-Kinotechnik 1956
- [4] Schaltnetzteile und ihre Aluminium-Elkos. Druckschrift der Fa. Sprague GmbH 1979
- [5] Langer, H.-D.; Schuricht, K.: Bauformen und Funktion von Elektrolytkondensatoren. radio fernsehen elektronik 29 (1980) H. 7, S. 447 bis 453
- [6] Patrick, D.; Nögel, D.; Helwig, G.: Moderne Kondensator-technologien, Aufbau und Eigenschaften. Jahrbuch der Unterhaltungselektronik 1978 (BRD)
- [7] Darbie, A. M.; Gallo, J. S.: Electrical Design Requirements for Electrolytic Capacitors Used in Regulated Low Voltage DC Power Supplies. IEEE Transactions on parts, hybrids and packaging volume (1973) H. 3, S. 167-175
- [8] Langer, H.-D.: Stumpfschweißen in der Kondensatorindustrie - Grundlagen und Anwendung. Schweißtechnik 28 (1978) H. 4, S. 162
- [9] Klasche, G.: Passive Bauelemente - Stand und Entwicklung. Elektronik-Report (1979) H. 19, S. 1