

AARHUS TEKNIKUM
SVAGSTRØMSAFDELINGEN

KONDENSATORER .

TILSKRIFT

SVAGSTRØMSTEKNISKE KOMPONENTER OG MATERIALER

T-MTL 1

Sv. E. Jensen
Juli 1979
Revideret juli 1981.

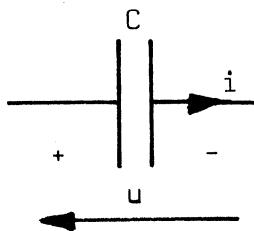
Indholdsfortegnelse:

	Side
1. Komponentbegrebet	2
2. Kondensatorer med fast dielektrikum	9
3. Elektrolytkondensatorer	24
4. Variable kondensatorer	36
5. Pålidelighed af kondensatorer	39
6. Litteratur	45

K O N D E N S A T O R E R.

1. KOMPONENTBEGREBET.

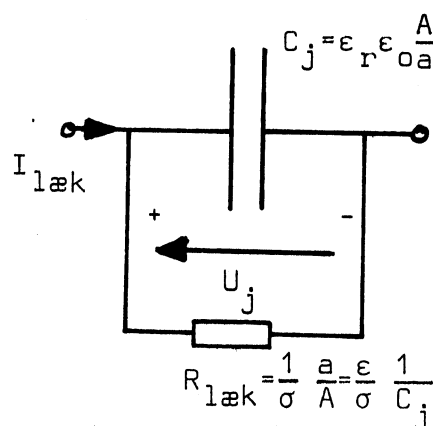
I fysikken og kredsløbstechnikken har vi arbejdet med begrebet kapacitet med symbolet C som et kredsløbselement, der knytter strøm og spænding sammen ved differentiaalligningen



$$i = C \frac{du}{dt} \text{ eller integralligningen (1)}$$

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t i \, dt + u(0) \quad (2)$$

Lægges en jævnspænding $u = U_j$ over kapaciteten, vil der ikke løbe nogen strøm. I en virkelig kondensator isoleret med et dielektrikum med specifik ledningsevne σ , vil der løbe en lækstrøm $I_{\text{læk}} = \sigma \frac{A}{a} \cdot U_j$, når belægningerne har areal A og afstand a . Kondensatoren har, når dielektrikumet har dielektricitetskonstanten $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, kapaciteten $C_j = \epsilon \frac{A}{a}$, d.v.s. $I_{\text{læk}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \epsilon \frac{A}{a} U_j = \frac{\sigma}{\epsilon} C_j U_j$. I sammenligninger imellem kondensatorer med forskellige dielektrika beskriver man lækstrømmen ved størrelsen $i_{\text{læk}} = \frac{\sigma}{\epsilon} \left[\frac{A}{FV} \right]$, og man kan tegne det på fig. 1 viste ækvivalentdiagram for kondensatoren.



Figur 1.

Påtrykker man en ideel kapacitet en sinusformet vekselspænding

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

fås af ligningen (1) ved differentiation, at der igennem den vil løbe strømmen

$$i = C \frac{du}{dt} = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{eller}$$

$$i = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + 90^\circ + \alpha) \quad (4)$$

eller idet

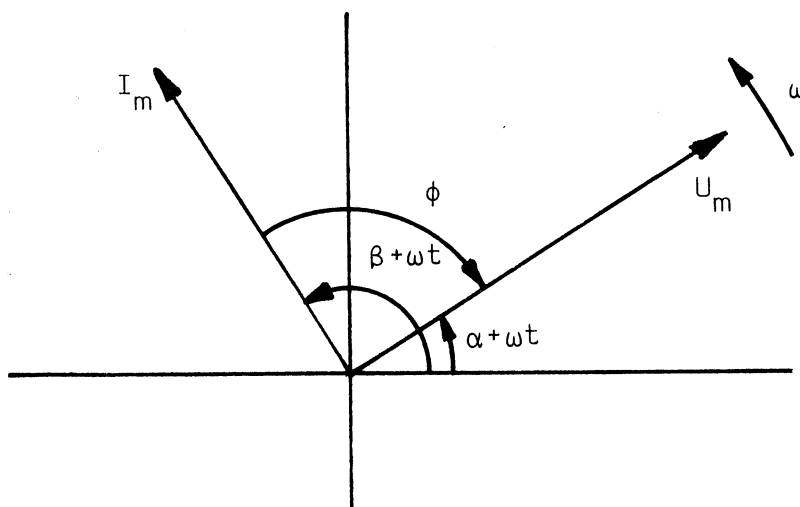
$$I_m = C \cdot U_m \cdot \omega = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \quad \text{og} \quad \beta = 90^\circ + \alpha$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad (5)$$

Vinklen ϕ mellem spænding og strøm bliver

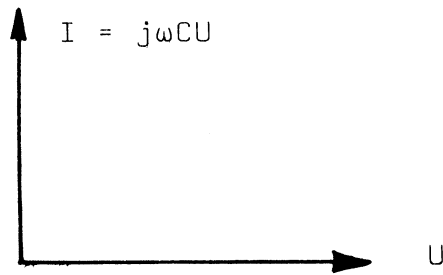
$$\phi = \alpha - \beta = \alpha - (90 + \alpha) = -90^\circ \quad (6)$$

Se fig. 2.



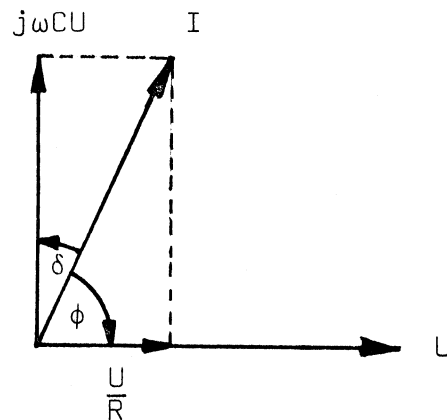
Figur 2.

Med effektivværdier af I og U fås det stivnede tidsvektordiagram fig. 3.



Figur 3.

Den virkelige kondensator vil trække en strøm I , som er forskudt mindre end 90° foran spændingen, idet en del af strømmen er i fase med U . Man får $\phi = -90^\circ + \delta$, hvor δ kaldes tabsvinklen. Se fig. 4.



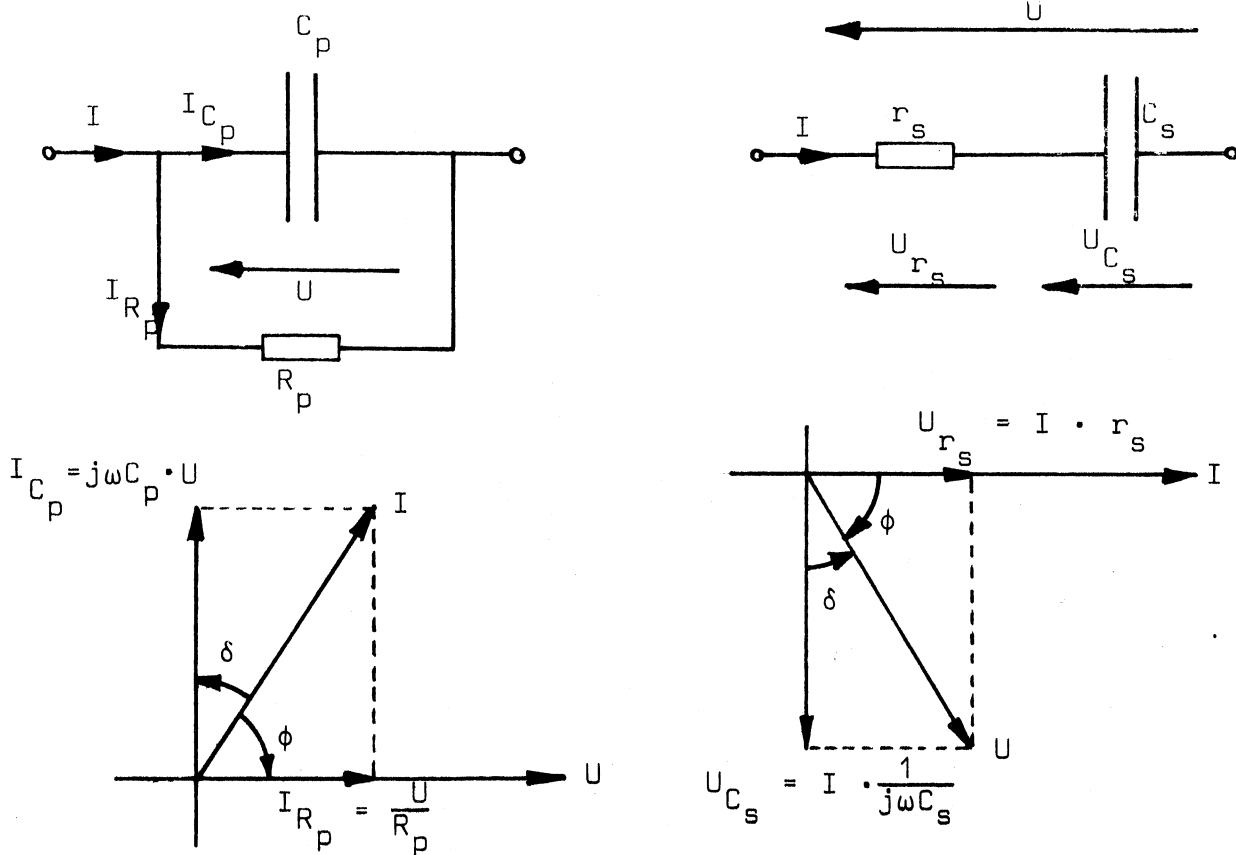
Figur 4.

Den del af strømmen, som er i fase med spændingen, skyldes delvis lækstrømmen $\frac{U}{R_{læk}}$, men selv ved lave frekvensen er strømmen betydelig større end lækstrømmen. Dette skyldes, at ompolariseringen af dielektrik特 ikke foregår tabsfrit.

Man definerer tabsfaktoren

$$d = \operatorname{tg} \delta$$

Ved enhver frekvens kan kondensatoren kredsløbsmæssigt beskrives af to ækvivalentdiagrammer, et af parallel- og et af serietypen, fig. 5.



Figur 5.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} = d$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s r_s \quad (7)$$

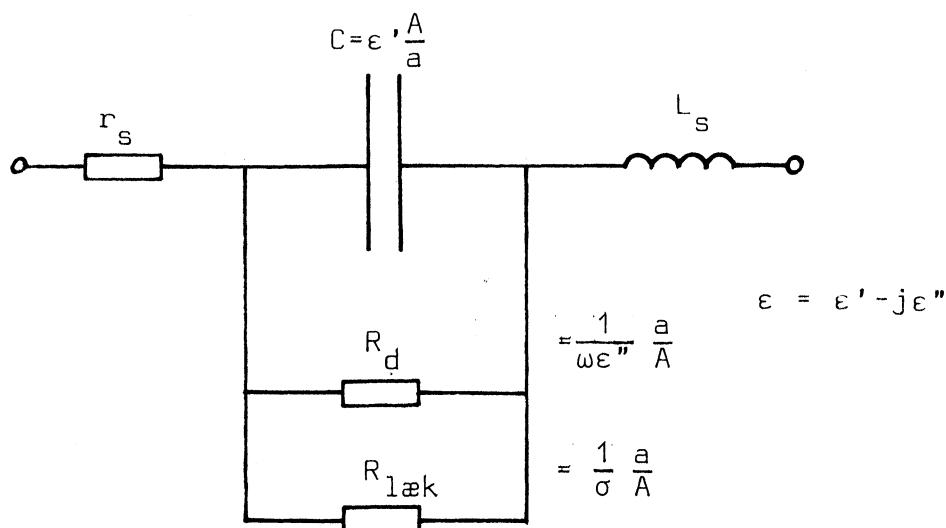
$$C_p = \frac{C_s}{1 + d^2} \approx C_s$$

$$C_s = C_p (1 + d^2) \approx C_p \quad (8)$$

$$R_p = \frac{1}{\omega C_s} \cdot \frac{1 + d^2}{d} \approx \frac{1}{\omega C_s} \cdot \frac{1}{d}$$

$$r_s = \frac{d}{\omega C_p} \cdot \frac{1}{1 + d^2} \approx \frac{d}{\omega C_p} \quad (9)$$

Når $d < 0,1$ er $C_s \approx C_p = C$ og $r_s R_p = \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2$



Figur 6.

Ækvivalentdiagrammerne i fig. 5 giver meget ufuldstændige oplysninger om komponentens fysiske egenskaber.

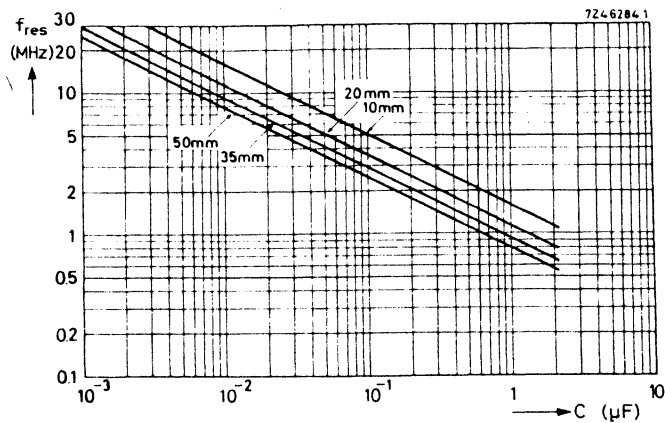
I fig. 6 er et lidt nøjagtigere ækvivalentdiagram vist. $C = \epsilon' \frac{A}{a}$ er kapaciteten af en kondensator med de givne data for pladeareal og pladeafstand og udfyldt med et dielektrikum med absolut dielektricitetskonstant ϵ' , som angiver realdelen af det benyttede dielektrikums dielektricitetskonstant ved den frekvens, for hvilken ækvivalentdiagrammet er tegnet. I parallel med C ligger to modstande $R_{læk} = \frac{1}{\sigma} \frac{a}{A}$ og $R_d = \frac{1}{\omega \epsilon''} \frac{a}{A}$. R_d beskriver de dielektriske tab, og ϵ'' er størrelsen af imaginærdelen af den komplekse dielektricitetskonstant ved den betragtede frekvens. R_d er normalt meget mindre end $R_{læk}$. Seriemodstanden r_s er et mål for modstanden i tilledningerne og kondensatormetalfolierne. Da strømmen skaber magnetfelt, får man endelig en serieselvinduktion L_s i ækvivalentdiagrammet. Diagrammet i den foreliggende form er brugeligt i et frekvensområde, hvor det er forsvarligt at beskrive kondensatoren ved et kredsløb med koncentrerede parametre.

Ser man et øjeblik bort fra modstandene R_d og $R_{læk}$ får man, at kondensatorens resonansfrekvens

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \cdot C}} \quad (10)$$

Resonansfrekvensens afhængighed af tilledningernes længde ses af fig. 7, der er typisk for "viklede" kondensatorer. Dette resonansfænomen er i praksis særdeles betydningsfuldt, idet kondensatoren ved højere frekvenser end resonansfrekvensen, optræder som en selv-

induktion og derfor får højere impedans, når frekvensen stiger. Dette sætter f.eks. en grænse for, hvor store afkoblingskondensatorer man kan anvende ved høje frekvenser.



Resonance frequency as a function of the capacitance,
at different total wire lengths

Figur 7.

Kondensatorens egenskaber er stærkt afhængige af det benyttede dielektrikum. I en oversigt over faste kondensatorer er der ud for forskellige dielektrika anført kapacitetsområde, toleranceområde, temperaturområde, frekvensområde, mærkespændingsområde (jævnspænding), stabilitet og tg δ. Selv med en oversigt som tabel 1 er det ikke givet, at man kan vælge den for en given anvendelse gunstigste kondensator. I denne anledning vil vi i de følgende afsnit 2 og 3 omtale nogle af de typiske udførelsesformer for kondensatorer med fast dielektrikum henholdsvis dielektrikum frembragt ad elektrolytisk vej. Når man læser data for kondensatorer er det vigtigt at bemærke målebetingelserne. Under alle omstændigheder må frekvensen opgives, og både C og tg δ må måles ved samme frekvens. Eventuelt kan også målespændingens størrelse have betydning. Isolationsmodstanden eller lækmodstanden er naturligvis afhængig af kondensatorens mærkespænding, men er tillige meget temperaturafhængig og desværre hyppigt tids- og spændingsafhængig, ligesom den omgivende luftsfugtighed kan have stor betydning.

Oversigt over faste kondensatorer.

Dielektrikum	Kapacitets- område	Tolerans- område (%)	Temperatur- område (°C)	Frekvens- område (MHz)	Märksp. område (V) (liksp.)	Stabilitet (ΔC %)	Förlust- vinkel $\tan \delta$ (% vid 1 kHz)		
							-40°	20°	70°
Papper-olje	1 nF—25 μ F	$\pm 5-20$	-40/+100	0—0,1	100—10 000	3—5	0,5	0,3	0,3
MP	10 nF—100 μ F	$\pm 5-20$	-55/+125	0—0,2	100—1 000	3	1,5	0,5	0,4
Papper-polyester	10 nF—20 μ F	$\pm 5-20$	-55/+125	0—0,5	100—1 000	2	0,9	0,7	0,5
Polyester	10 nF—20 μ F	$\pm 1-20$	-55/+125	0—1	50—1 000	3	1,2	0,6	0,2
Polystyrol	10 pF—0,5 μ F	$\pm 0,1-5$	-40/+70	0—1 000	50—2 000	0,2—0,5	0,02	0,02	0,03
Polykarbonat	100 pF—2 μ F	$\pm 1-20$	-55/+125	0—1	50—400	1	0,4	0,1	0,07
Celi 3-acetat (lackfilm) ..	10 nF—200 μ F	$\pm 10-20$	-40/+85	0—0,1	50—600	2—5	2	1	0,7
Keramik, låg ϵ	1 pF—500 pF	$\pm 1-10$	-55/+125	0—1 000	50—500	0,5	0,05	0,04	0,06
Keramik, hög ϵ	100 pF—0,1 μ F	$\pm 2-20$	-55/+125	0—0,1	200—1 000	5—20	3	2	1
Silverglimmer	1 pF—0,1 μ F	$\pm 1-10$	-55/+125	0—500	125—500	0,2	0,04	0,05	0,05
Glas	100 pF—10 nF	$\pm 1-10$	-55/+200	0—500	250—500	0,5	0,06	0,06	0,07
Porslin	1 pF—10 nF	$\pm 1-10$	-55/+125	0—100	100—500	0,5	0,03	0,03	0,05
Al oxid	1—100 μ F	-10/+50	-55/+85	0—0,1	3—50	5	15	10	12
Al elektrolyt ets	1—10 000 μ F	$\pm 10-50$	(-40)/+70	0—0,001	3—550	10—30	—	15	10
Tant elektr, torr	1—500 μ F	$\pm 5-20$	-80/+125	0—0,1	3—100	5	8	5	6
Tant elektr, våt	0,1—1 000 μ F	$\pm 10-20$	-55/+175	0—0,1	3—200	5	7	3	4

Anm. För elektrolytkondensatorer är $\tan \delta$ mätt vid 50 Hz.

Tabel 1.

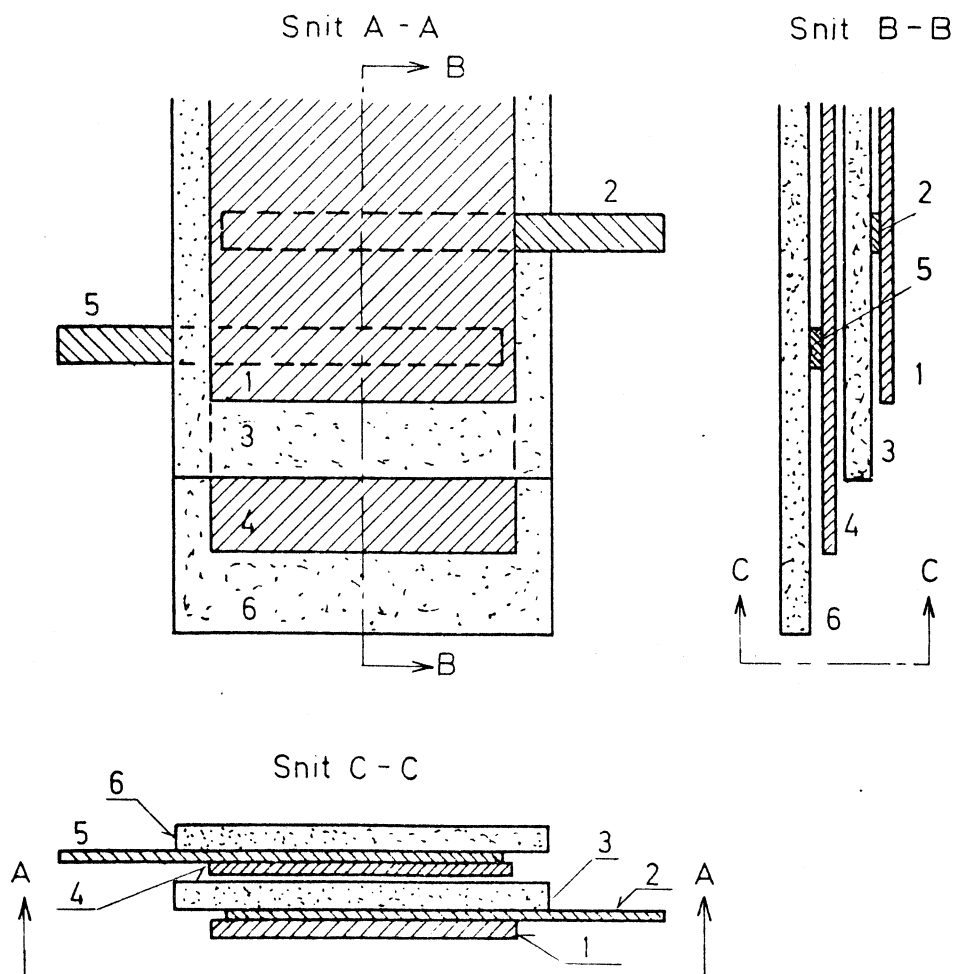
2. KONDENSATORER MED FAST DIELEKTRIKUM.

I dette afsnit vil vi omtale kondensatorer bestående af oprullede metalfolier adskilt af isolationsfolier samt keramiske kondensatorer og glimmerkondensatorer.

Rullekondensatorer.

Ved fremstilling af en kondensatorvikkel anvendes hyppigt en af to teknologier: vikler med terminaler bestående af indlagte strimler i viklen eller vikler med udragende folier. Af hensyn til vurdering af de fejl, som kondensatorerne udviser, vil vi beskrive de to metoder.

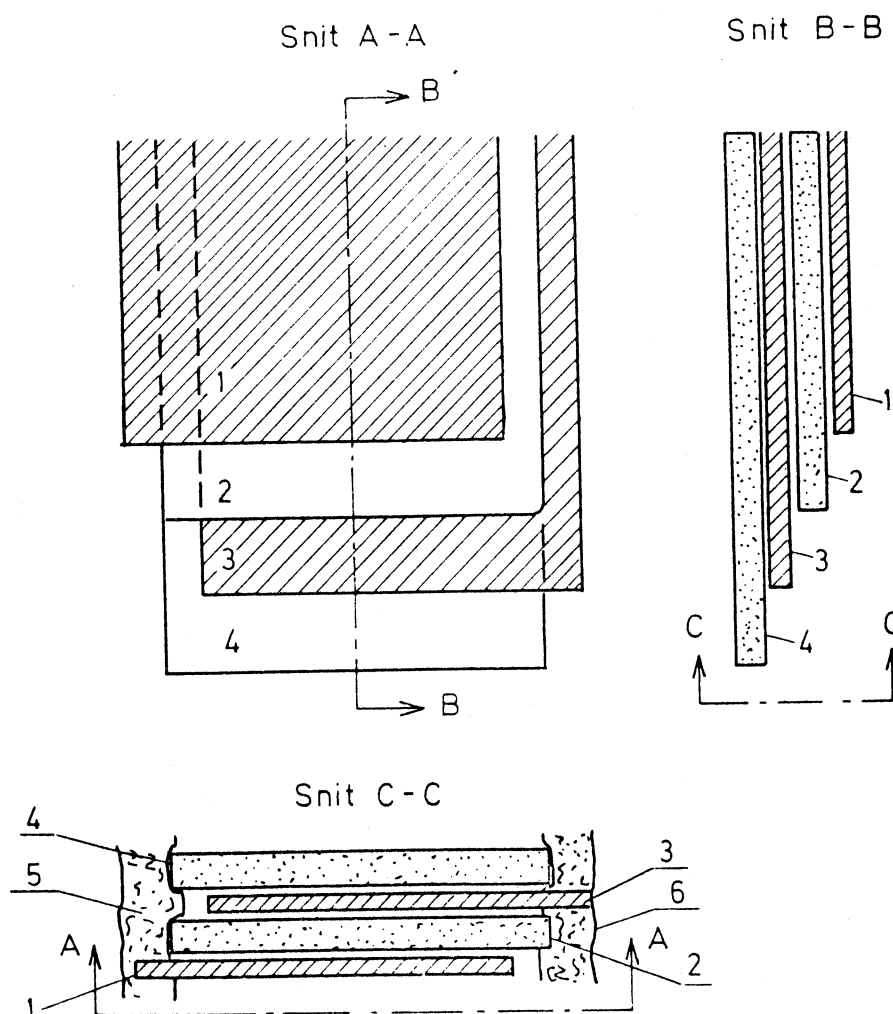
På fig. 8 er vist en del af en vikkel til en rullekondensator, hvor 1 og 4 er metalfolierne, 3 og 6 isolationsfolierne samt 2 og 5 de strimler der - nittet eller svejst til metalbelægningerne - tjener som terminaler.



Figur 8.

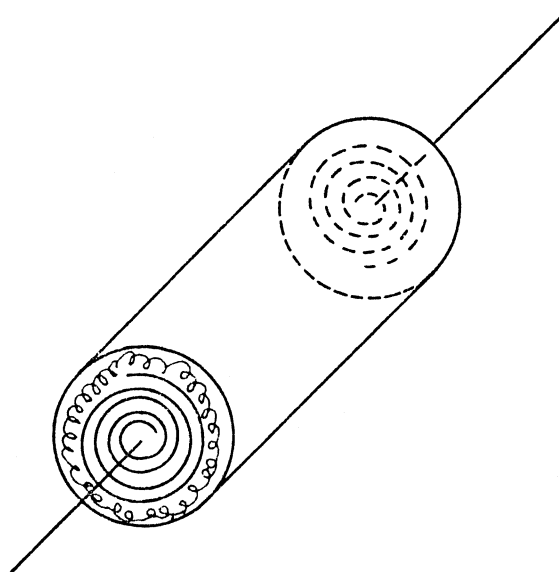
Ved oprulningen opnår man, at metalbelægningerne bliver aktive på begge sider. Den viste terminaludformning har den fordel, at terminalerne kan forbindes med metalfolierne før de termisk følsomme isolationsfolier lægges sammen med metalfolierne. Til gengæld vil denne udformning give kondensatorerne en ret stor ækvi-valent seriemodstand r_s og serieselvinduktion L_s . Er kontakten mellem terminalstrimlen og metalbelægningerne mangelfuld, kan kondensatorerne vise en meget mindre kapacitet, når man måler ved så lav spænding, at der ikke skabes metallisk kontakt imellem terminalstrimler og metalfolier.

På fig. 9 er vist, hvorledes man kan fremstille en vikkel med udragende metalfolier. Man ser, at de to isolationsfolier 2 og 4 er lige brede og ligger således, at de netop dækker hinanden.



Figur 9.

Metalfolierne 1 og 3 er forskudt således, at det ene folie rager ud af viklens ene ende, mens det andet folie rager ud i den modsatte ende. Den elektriske kontakt med metalfolierne opnås i denne konstruktion ved, som antydnet med 5 og 6 at sprøjte smeltet metal mod enderne af den stramt oprullede vikkel. Som metal kan f.eks. zink anvendes. Hvis metalfolierne er af aluminium, opnås der ikke en lodning, men erfaringen viser, at der opnås ret god elektrisk kontakt.



Figur 10.

Det er dog en problematisk fremgangsmåde, idet det smeltede zink har en temperatur, som vil være ødelæggende for næsten alle isolationsmaterialer, hvis påvirkningen er af længere varighed. Efter metalsprøjtningen kan terminaler loddes til de metalliserede enheder, som antydnet på fig. 10. Ved omhyggelig udnyttelse af denne metode kan man få en kondensator med lille seriemodstand r_s og serieselvinduktion L_s .

Det er klart, at det er afgørende for en vikkelkondensators pålidelighed, at kontakten imellem terminaler og metalfolier er sikker. I praksis prøver man dette ved elektriske målinger, idet man udsætter den færdige kondensator for spændingsimpulser med korte stigetider. Man prøver f.eks. med 3000 impulser med frekvens 1 Hz og stejleheder på 50, 100, 250, 400 eller 700 V/ μ sek. Hvis kontakten ikke er fuldstændig, vil strømtætheden i punkter

med kontakt kunne blive så stor, at også disse strømveje ødelægges på grund af overophedning.

For tiden fremstilles kondensatorer med isolation af olieimprægneret papir eller plastfolier. Til plastfolierne anvendes polyesterfolier (polyethylenterephthalat), polycarbonat, polystyren og polypropylen. Endvidere er polyethylen tilsyneladende på vej til at gøre sig gældende.

Papirkondensatorer.

Papirkondensatorer hører til den type kondensatorer, man har kendt længst, så fabrikkerne er i stand til at producere dem med stor pålidelighed. Papirkondensatorer kan ikke arbejde ved temperaturer over 100°C , deres stabilitet 3 - 5 % er ikke fremragende, tabsfaktoren har størrelsesordenen $\text{tg } \delta = 0,003$, og ^{$\sim 10^{-3}$} temperaturkoefficienten er af størrelsesordenen $0,1 - 0,3 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, dog stærkt afhængig af det anvendte imprægneringsmiddel. Da papir er meget hygroskopisk, må viklen beskyttes godt mod fugt, bedst ved indbygning i lufttæt beholder. Det er vanskeligt at fremstille papirbaner tyndere end $5 \mu\text{m}$ uden tværgående huller, derfor anvender man normalt flere lag papir, og heri kan man finde forklaringen på, at papirkondensatorer ikke fremstilles for mærkespændinger under 100 V.

Metalpapir- eller MP-kondensatoren.

Metalpapir- eller MP-kondensatoren er en variant af papirkondensatoren. I disse kondensatorer kan man opnå mere end dobbelt så stor kapacitet pr. rumfangsenhed, idet man reducerer metalfoliernes tykkelse ca. 10 gange ved at dampe zink eller aluminium direkte på dielektrikumsfolierne i meget tynde lag. Disse kondensatorer har den fine egenskab, at diskrete gennemslag gennem papiret fordamper metallagene omkring gennemslagsstedet, så kondensatoren bliver isolerende igen efter gennemslag - selvhelende. Kapaciteten falder uhyre lidt ved hvert gennemslag, så man kan tillade sig at lægge MP-kondensatorens arbejds-spænding meget nærmere gennemslagsspændingen for papirisolationen end i en normal papirkondensator. Man må dog gøre sig klart, at selvheling forlanger, at kondensatoren sidder i et lavimpedanset kredsløb således, at den kan disponere over mere end den i dens eget felt oplagrede elektriske energi til fordampning af metalbelæg-

ningerne omkring et gennemslagssted. Dens stabilitet 3 % er lidt bedre end papirkondensatorens, mens temperaturkoefficienten er som for papirkondensatoren. Dens lidt større $\text{tg} \delta$ (0,005) er forårsaget af, at dens ækvivalente seriemodstand r_s bliver større end papirkondensatorens. MP-kondensatoren har normalt fin kontakt imellem vikkel og terminaler.

Plast som dielektrikum.

I stigende grad afløses papirkondensatorer af kondensatorer fremstillet på samme måde, men med plastfolier som dielektrikum i stedet for papir. Metalliseringsteknikken anvendes også her og angives ved forkortelsen MK-, metalkunststof. Mange plastmaterialer har gode dielektriske egenskaber, men det har vist sig vanskeligt at fremstille tynde hulfrie folier. Meget tynde folier er med held udført af opløselige plastmaterialer den såkaldte lakfilmteknik, hvorved det er muligt at fremstille film helt ned til 0,5 μm tykkelse.

Polyester.

Polyester (polyethylenterephthalat) er et dielektrikum, som i stort mål erstatter papir, da det er lidt mere temperaturbestandigt - op til 125°C.

Det er også kendt under handelsnavne som Hostaphan og Mylar. Kondensatorerne fremstilles enten med aluminiumfolie eller med et tyndt pådampet metallag (0,02 - 0,05 μm). Ved lavfrekvens er $\text{tg} \delta \approx 0,01 - 0,02$. $\epsilon_r \approx 3$.

Polycarbonat.

Polycarbonat er et dielektrikum, der besidder næsten alle de egenskaber, som skulle gøre det muligt at fremstille en universielt anvendelig kondensator. Stabiliteten er ca. 1 %, temperaturkoefficienten ved 20°C ca. $0,2 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$ (dog meget ulineært temperaturforløb ved temperaturer over 50°C), tabsfaktoren er $\text{tg} \delta = 0,001$ ved 1000 Hz, men den forøges stærkt ved frekvenser over ca. 100 kHz. Temperaturbestandigheden er god op til 105°C. Også disse kondensatorer fremstilles med enten folie eller pådampet metallag.

Celluloseacetat.

Celluloseacetat anvendes som dielektrikum i kondensatorer, hvor

det som en lakfilm lægges på aluminiumfolie, og på lakfilmen pådampes aluminium som den anden belægning. Egenskaberne ligner polyesterkondensatorernes.

Kondensatorer med følgende 4 plastmaterialer som dielektrikum udmerker sig ved meget små dielektriske tab, også ved høje frekvenser.

Polystyren.

Polystyren (polystyrol, styroflex) har mange fremragende elektriske egenskaber, da det er et ikke polært materiale. Både ϵ og $\tan \delta$ holder sig meget konstante helt op i gigahertzområdet, $\tan \delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Temperaturkoefficienten er negativ ca. $-0,2 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, og temperaturgangen er meget lineær. Stabiliteten er meget god: 0,3 %. $\epsilon = 2,5$.

Den svagt negative temperaturkoefficient gør polystyren velegnet til anvendelse i svingningskredse i forbindelse med ferritspoler, idet spolens positive temperaturkoefficient kan udkompenseres. Polystyren er praktisk talt uimodtagelig for fugtighed.

To skavanker begrænser dog anvendelsen, dels det meget begrænsede temperaturområde $-40/+70^{\circ}\text{C}$ og dels den kendsgerning, at materialet er opløseligt i organiske opløsningsmidler, som kan trænge ind i viklen.

N.B. Polystyrens lave blødgøringsstemperatur bevirker blandt andet, at en polystyrenkondensators kapacitet hyppigt ændres ved ilodning, idet varmen fra terminalerne bevirker en deformation af dielektrik特.

Polypropylen.

Polypropylen har elektriske egenskaber, der nærmer sig polystyren og dets temperaturbestandighed er væsentlig bedre, op til omkring 105°C . Endvidere er dets evne til at klare impulser særdeles god, hvorfor det anvendes f.eks. i tilbageløbskredsløb i TV-modtagere. Til stærkstrømsformål anvendes polypropylen-kondensatorer også i vid udstrækning.

Det ser ud til, at polypropylen i mange tilfælde vil afløse polycarbonat.

Polyethylen.

Polyethylen har ligeså gode elektriske egenskaber som polystyren, men er ikke så let at fremstille som folier.

Polytetrafluorethen (teflon, PTFE) har også elektriske egenskaber som polystyren, $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-4}$, $\epsilon_r = 2,1$, men det kan tåle temperaturer på op til $250-300^\circ\text{C}$. Til gengæld er det betydelig vanskeligere at forarbejde. Materialet er termoplastisk, men viskositeten er meget stor selv ved høje temperaturer. Desuden er det et dyrt materiale. Det er særdeles bestandigt overfor alle kendte opløsningsmidler.

Til visse specielle formål er teflon-kondensatorer særdeles fortræffelige, idet der i disse kun optræder meget lille absorption. Ved absorption forstår man det fænomen, at der ved opladningen af en kondensator ved indre grænseflader i dielektrikummet dannes rumladninger, som selv en kortslutning af kondensatoren ikke aflader. I et højimpedanset kredsløb vil man derfor efter en kortslutning kunne måle en spænding, der er en større eller mindre brøkdel af den tidligere påtrykte spænding. I en teflonkondensator er denne spænding omkring 0,01 %, hvorimod den i ferroelektriske keramiske materialer kan være over 10 %.

De to sidste kondensatortyper anvendes ikke i meget store antal.

Til visse formål bruger man en kombination af papir og plastfolie som dielektrikum, f.eks. polyester + papir, polycarbonat + papir, polypropylene + papir.

Tabel 2 og figur 11 giver en oversigt over de almindeligste plastkondensatorer.

Vergleich der Dielektrika für KF-Kondensatoren

KS-Kondensatoren

Als Dielektrikum findet bei den KS-Kondensatoren Polystyrol Verwendung. Es besitzt einen sehr kleinen Verlustfaktor, hohe Kapazitätskonstanz, geringe Frequenzabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors sowie einen für Kompensationszwecke günstigen negativen, linearen Temperaturkoeffizienten der Kapazität.

KP-, MKP-Kondensatoren

Polypropylen, das Dielektrikum der KP- und MKP-Kondensatoren, besitzt ähnliche günstige Eigenschaften wie Polystyrol. Außerdem zeichnen sich Polypropylen durch eine hohe Impulsspannungsfestigkeit und geringe Feuchtebeiwerte aus. Polypropylen besitzt eine höhere Temperaturbeständigkeit als Polystyrol.

KC, MKC-Kondensatoren

Die KC- und MKC-Kondensatoren enthalten als Dielektrikum Polycarbonatfolien. Dieses Material zeigt eine hohe Wärmebeständigkeit, gute Impulsspannungsfestigkeit und einen kleinen T_k . Der Verlustfaktor dieser Kondensatoren liegt zwischen denen von KP- und KT-Kondensatoren.

KT, MKT-Kondensatoren

Als Dielektrikum wird bei den KT- und MKT-Kondensatoren Polyterephthalsäureester verwendet. Dieses Material besitzt hohe Spannungsfestigkeit, große Wärmebeständigkeit und eine gute Impulsspannungsfestigkeit. Es lassen sich Kondensatoren mit größten Volumenkapazitäten herstellen. Der Verlustfaktor ist relativ hoch, er ist ebenso wie die Kapazität stark frequenz- und temperaturabhängig.

Kunststoff-Vergleichstabelle (Richtwerte)

Plastic foil – table of comparison (Approx. ratings)

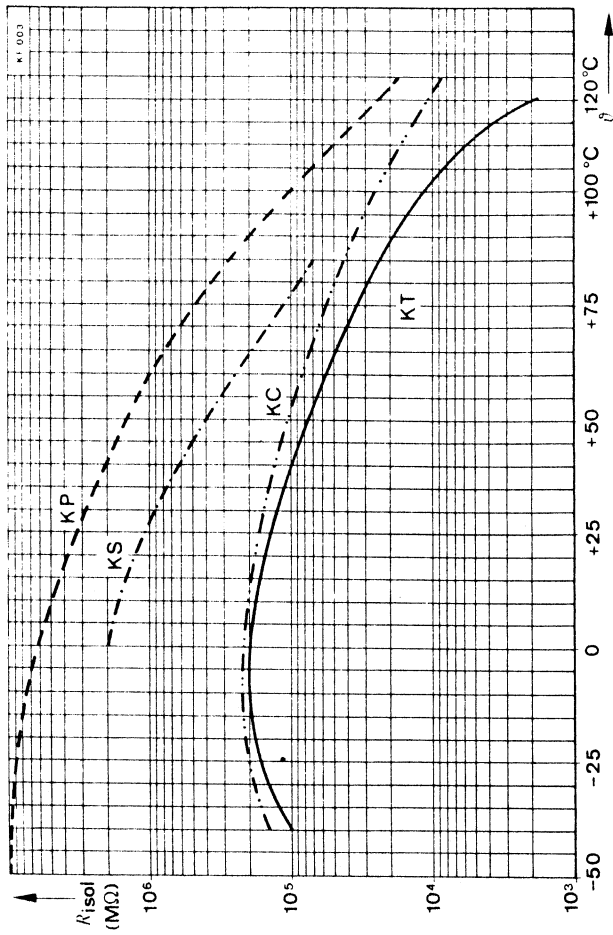
Type Type		KS	KP MKP/PKP	KC MKC	KT MKT
Relative Dielektrizitäts-Konstante Relative dielectric constant	ϵ_R	2.4	2.2	2.8	3.2
Verlustfaktor bei 1...100 kHz Dissipation factor at 1...100 kHz	$\tan \delta \times 10^{-3}$	0.15...0.2	0.2...0.3	1...8	5...25
Impulsbelastbarkeit Pulse loading capacity	du/dt	mäßig indifferent	sehr gut very good	gut good	gut good
Zeitliche Inkonstanz der Kapazität Inconstancy in time of the capacitance	$\frac{\Delta C}{C}$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2\%$
Einsatztemperatur Working temperature	ϑ in °C	-40...+70	-55...+105	-55...+105	-55...+125

KS: Polystyren
KP: Polypropylen
KC: Polycarbonat
KT: Polyester

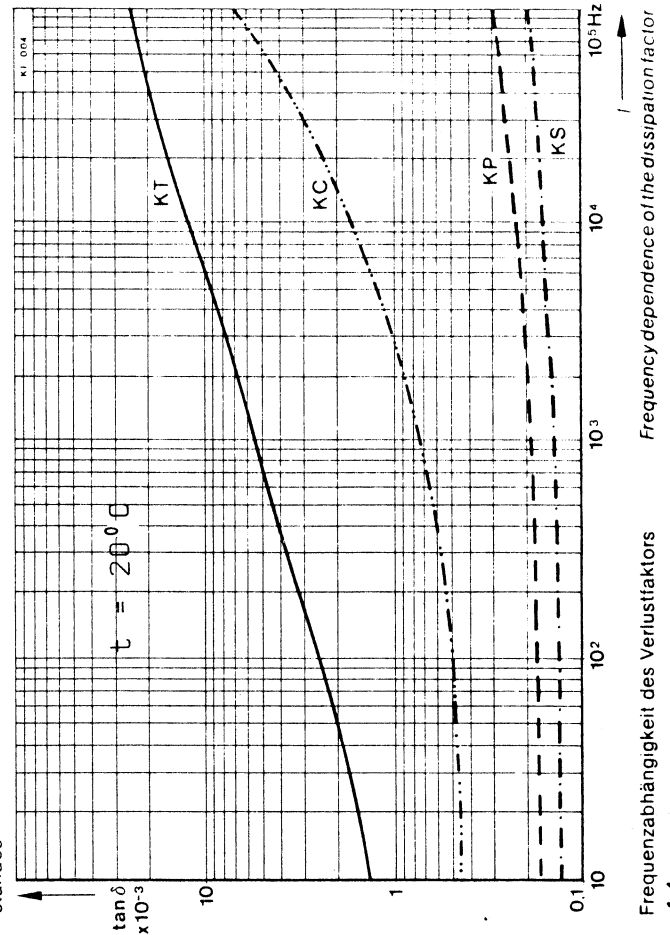
Table 2.

Table 2.

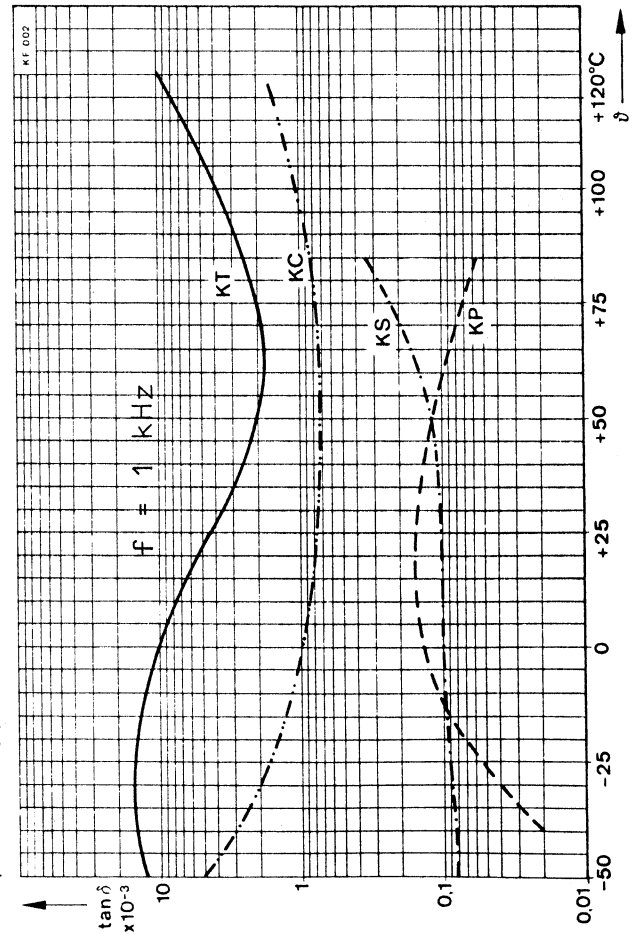
KS: Polystyren
 KP: Polypropylen
 KC: Polycarbonat
 KT: Polyester



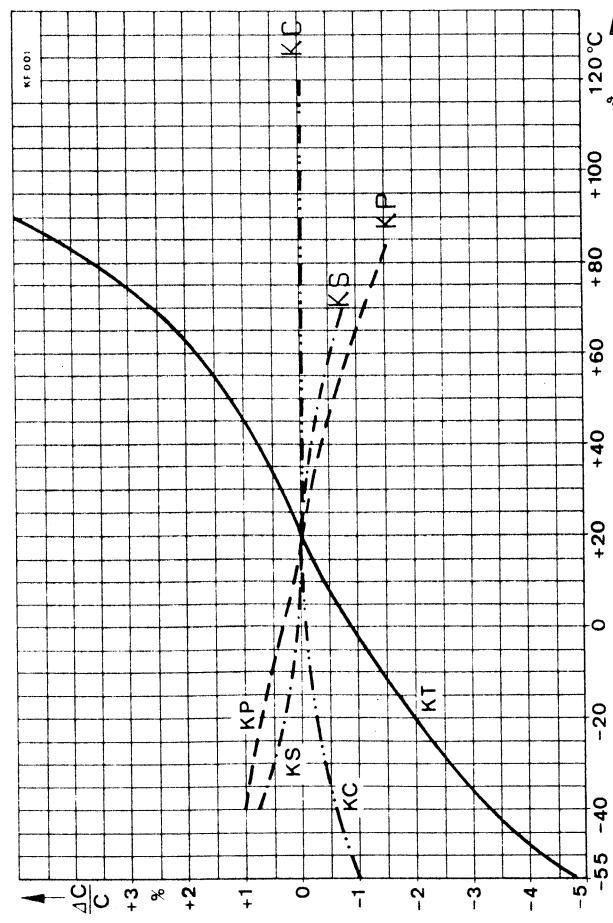
Temperaturabhängigkeit des Isolationswiderstandes



Temperaturabhängigkeit der Kapazität



Charakteristische Eigenschaften von Kunststoff-Dielektrika



Characteristics of Plasticfilms for Capacitors

Figur 11.

Keramiske kondensatorer.

Keramiske kondensatorer omfatter en stor gruppe kondensatorer med forskellige egenskaber, hvis fælles kendetegn er anvendelsen af keramiske oxyder som dielektrikum.

Det er uorganiske, ikke-metalliske, polykrystallinske legemer, der er fremstillet af råstofferne ved brænding ved høje temperaturer. Enkeltkrystallerne i det polykrystallinske materiale er i størrelsesordenen 1 - 100 μm .

Det vigtigste råstof er Titandioxyd (Ti O_2). Dette materiale har i sig selv en meget høj dielektricitetskonstant, $\epsilon_r \approx 100$, og ved tilsætning af andre stoffer kan man regulere ϵ_r .

Specielt kan man ved tilsætning af Bariumoxyd i forhold 1:1, så man får Bariumtitanat (Ba TiO_3), få særdeles høje ϵ_r -værdier, op til 50000, hvilket giver høje kapacitetsværdier pr. volumen-enhed. Samtidig sætter man dog en del gode egenskaber til, idet materialet bliver stærkt ferroelektrisk, og der optræder orienteringspolarisation.

Ved fremstillingen bliver blandingen af metaloxyder under tilsætning af egnede plastificeringsmidler presset sammen og formet til rør eller skiver, hvorefter det sintres ved 1200 - 1400°C.

Materialets egenskaber er bestemt, ikke alene af sammensætningen, men i høj grad også af de forskellige bearbejdningsparametre, specielt af temperaturforløbet under sinterprocessen.

De sintrede keramiklegemer forsynes med metalbelægninger af sølv eller nikkel. En speciel form er flerlagskondensatorerne, hvor de enkelte keramikskiver metalliseres med ædelmetal (palladium) inden sintringen, så man får en blok med afvekslende lag af keramik og metal.

De keramiske kondensatorer inddeles efter deres elektriske egenskaber i to hovedgrupper.

Type 1:

Type 1 har relativt lave dielektricitetskonstanter med $\epsilon_r = 6$ til 250 og tabsfaktoren $\text{tg } \delta$ er max. $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Temperaturkoefficienten kan antage meget varierende men veldefi-

nerede værdier, som for den enkelte kondensator er praktisk talt konstant.

Denne egenskab er særdeles betydningsfuld, idet kondensatorerne på grund af deres små tab er velegnede som afstemningskondensatorer i svingningskredse og filtre, hvor det kan være vigtigt at kompensere for spolers temperaturkoefficient, der som regel er positiv. Man har valgt at karakterisere type 1 kondensatorer ved deres temperaturkoefficient og at standardisere et vist antal værdier. Se tabel 3.

Kondensatorerne fremstilles i mange forskellige udførelser, se tabel 4.

For rørkondensatorer anvendes en mærkning med farvekode som vist i tabel 5.

Tabelle IX Eigenschaften keramischer Klein-Kondensatoren

Übersicht

Bezeichnung	Typ I											Typ II			
	P 100	NP 0	N 033	N 075	N 150	N 220	N 330	N 470	N 750	N 1500	N 2200	DK 700	DK 2000	DK 4000	DK 10000
Dielektrizitätskonstante	~ 6,5... 14	~ 15 ~ 38	~ 15,5 ~ 40	~ 16,5 ~ 41	~ 18 ~ 42	~ 19,5 ~ 48	~ 22 ~ 52	~ 24 ~ 65	~ 36 ~ 90	~ 40 ~ 180	~ 230	~ 700	~ 2000	~ 4000	~ 10 000
TK _c -Mittelwert in 10 ⁻⁶ /grd	+ 100	± 0	- 33	- 75	- 150	- 220	- 330	- 470	- 750	- 1500	- 2200	Temperaturcharakteristik nach DIN 41 920 II P II P II T —			
TK _c -Toleranz für C > 15 pF	IA IB	± 15 ± 30	± 15 ± 30	± 15 ± 30	± 15 ± 30	± 15 ± 30	± 30 ± 60	± 40 ± 80	± 60 ± 120	— ± 250	— ± 250				
TK _c -Toleranz für Kapazitätswerte < 15 pF												± 10%	± 10%	+ 30% - 50%	—
Verlustfaktor in 10 ⁻³ (Mittelwert)	0,3...0,5	~ 0,4	~ 0,4	~ 0,4	~ 0,4	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,5	≤ 20			
Isolationswiderstand	≥ 10 ¹⁰ Ω											C ≤ 25000d F > 10 ¹⁰ Ω C > 25000 pF R · C = 75 s			
Zulässiger Temperaturbereich	von -25°C bis +85°C (DIN 40 040 Anwendungsklasse HPG)														
Zulässige mittlere rel. Luftfeuchte	~ 65% (DIN 40 040 Anwendungsklasse HPG)														
Höhensicherheit	400 Torr = 533 mbar (das entspricht etwa einer Höhe von 5100 m)														
Grundfarbe	hellgrau											braun			
Farbpunkt für die TK _c -Kennzeichnung	rot + violett	schwarz	braun	rot	orange	gelb	grün	blau	violett	orange + orange	gelb + gelb	rot	rot	blau	—

Tabel 3.

Kondensatoren

Tabelle X Keramische Klein-Kondensatoren

Baformen

In der <eckigen Klammer> sind die Kennbuchstaben für Bauformen nach DIN-Entwurf 41 930 angegeben			
	<Sw> Scheibenkondensator mit Drahtanschlüssen unter 60°-Winkel	<Dde> Durchführungskondensator, einlötfar mit Drahtanschlüssen	<Dub> Durchführungskondensator, einlötfar mit Drahtanschlüssen
<Rdp> Rohrkondensator mit radialen Drahtanschlüssen	<Sp> <Spi> Scheibenkondensator mit parallelen Drahtanschlüssen	<Ddn> Durchführungskondensator mit Lötflansch und Drahtanschlüssen	SRd <Dsl> Stützpunktkondensator mit Drahtanschluss auf einer Seite
<Rdpi> Rohrkondensator mit radialen Drahtanschlüssen	<Se> Scheibenkondensator einlötfar (ohne Drahtanschluss)	<Dsn> Durchführungskondensator mit Lötflansch und Stiftleiter	<Dfl> Stützpunktkondensator mit Löt-fahnenanschluss auf einer Seite
<Hdpm> <Hdpm> Standkondensator mit parallelen Drahtanschlüssen, steckbar	<Te> Trapez-Kondensator einlötfar (ohne Drahtanschluss für gedruckte Schaltung)	<Dpd> Durchführungskondensator mit Drahtanschlüssen, steckbar	DurchführungsfILTER
<Rdrl> Rohrkondensator mit radialen Drahtanschlüssen, steckbar	<Edp> <Edr> Rechteck-Kondensator mit parallelen Drahtanschlüssen	<Dul> Durchführungskondensator mit Drahtanschluss auf beiden Seiten	<Rdpz> Rohrkondensator für Impuls-spannung mit Drahtanschlüssen
Rohrkondensatorbatterie, 2fach mit radialen Drahtanschlüssen	<Edg> Rechteck-Kondensator mit axialen Drahtanschlüssen	<Dfl> Durchführungskondensator mit Löt-fahnenanschluss auf beiden Seiten	<Rei> Berührungsschutzkondensator, einlötfar

MARKINGColour code

	temperature coefficient	capacitance value			tolerance on capacitance	
		first digit	second digit	multiplier for the capacitance	C ≤ 10 pF (pF)	C > 10 pF (%)
red/violet	P100					
black	NP0		0	1		±20
brown	N033	1	1	10	±0,1	±1
red	N075	2	2	10 ²	±0,25	±2
orange	N150	3	3	10 ³		
yellow	N220	4	4	10 ⁴		
green	N330	5	5		±0,5	±5
blue	N470	6	6			
violet	N750	7	7			
grey		8	8	10 ⁻²		
white		9	9	10 ⁻¹	±1	±10
orange/orange	N1500					

Figure code

colour code for temp. coefficient, see Table above

capacitance value in pF, using K for the thousands

code for tolerance on capacitance:

C ≤ 10 pF		C > 10 pF	
tol (pF)	code	tol (%)	code
±0,25	C	±1	F
±0,5	D	±2	G
±1	F	±5	J
		±10	K
		±20	M
		-20/+50	S

Tabel 5.

Type 2 (High-K-kondensatorer):

Type 2 har ϵ_r -værdier fra 250 til 50000, og tabsfaktoren $\tan \delta$ ligger i området 5 til $50 \cdot 10^{-3}$. Temperaturkoefficienten er langt fra konstant. Den kan variere fra en positiv til en negativ værdi for samme materiale, afhængig af temperatur, således at kapaciteten er maksimum ved en bestemt temperatur. For nogle typers vedkommende kan kapaciteten falde til under det halve ved en temperaturændring på 30°C.

Kapacitetens størrelse er også stærkt afhængig af feltstyrken i materialet, d.v.s. den påtrykte spænding.

Tabsfaktoren $\tan \delta$ er stærkt afhængig af temperaturen; for nogle typer falder $\tan \delta$ meget stærkt med temperaturen.

Isolationsmodstanden er afhængig af kapaciteten, således at tidskonstanten er nogenlunde konstant, især ved store kapacitetsværdier.

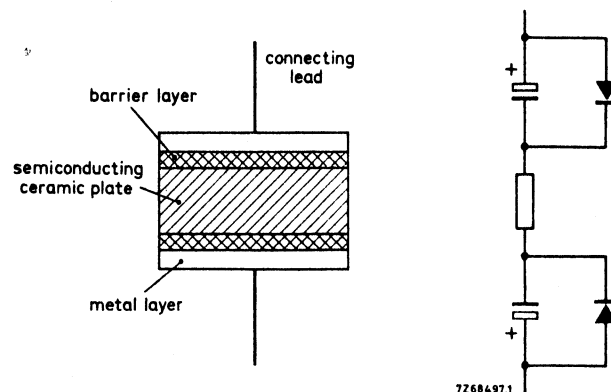
Type 2 kondensator er klassificeret efter deres dielektricitetskonstant, og i tabel 3 er angivet nogle typer. Nogle fabrikanter har et større udvalg med ϵ_r op til 50000.

Som følge af de af arbejdsvilkår stærkt afhængige data er anvendelsesmulighederne for type 2 kondensatorer begrænset hovedsagelig til overførings- og afkoblingskondensatorer. Til gengæld har de ved hensigtsmæssig udførelsesform på grund af de små dimensioner kun lille selvinduktion og kan derfor anvendes ved relativt høje frekvenser.

Der fremstilles også en tredje type: Spærrelagskondensatorer (Barrier Layer Capacitor).

Type 3:

Kondensatorer af denne type består af en keramikart, der optræder som en halvleder, og på begge sider af materialet dannes p-n-overgange, der kommer til at virke som to serieforbundne dioder, der vender mod hinanden (anti-serie) se fig. 12.



Figur 12.

Diodernes spærrelagskapaciteter ligger også i serie og danner kondensatoren, som kun kan anvendes ved lave spændinger (6 - 18 volt), men til gengæld giver meget stor kapacitet på lille plads. Kapacitetsstabiliteten er dårlig, og tabene store. Type 3 kondensatorer vil sikkert blive fortrængt af type 2, idet disse kan fremstilles med langt højere isolationsmodstand.

Fejl i keramiske kondensatorer.

Ved presning af keramikskiverne kan der opstå huller eller revner, som under forsølvningen delvis udfyldes med sølv. I rørkondensatorer kan tin løbe ind i røret ved fastlodning af terminalen til den indvendige sølvbelægning, hvorved røret sprænges, når tinnet trækker sig sammen under størkning. I de punkter, hvor metalbelæggingerne er nærmest hinanden, opstår der store feltstyrker, som kan forårsage hot spot effekter med varmegennemslag til følge.

Hvis keramikskiverne er forsølvet ekcentrisk, kan krybestrømsafstanden ved skivens rand blive for kort. Udsættes kondensatorerne samtidigt for jævnspænding og fugt, kan sølvet ved en elektrolytisk proces migrere, så der dannes tynde ledende forbindelser imellem sølvbelæggingerne. Migrationen er meget afhængig af fugtbeskyttelsens kvalitet. Nogle fabrikanter er på grund af migration gået over til at erstatte sølvet med andet metal.

Sølvbelæggingerne har en vis tendens til at gå løs fra keramikoverfladerne. I værste tilfælde kan belæggingerne falde helt af. Mindre hæftningsfejl fører til ustabil kapacitet og støj, som opstår, når kondensatorerne rystes (mikrofoni). De samme fejl kan opstå derved, at forsølvningen ved kanten af sølvlaget kan danne små "øer", som ikke har stabil forbindelse med sølvlaget. Ferroelektriske keramikker kan, når de arbejder ved høj temperatur og feltstyrke, reduceres. Dette vil føre til, at keramikken bliver halvledende med varmegennemslag til følge.

De omtalte fejl gør sig i særlig grad gældende ved lavvolt typer, hvor keramikken er uhyre tynd. For at undgå disse fejl udsættes kondensatorerne, efter fremstilling kortvarigt for høj overspænding og i nogle timer for en svag overspænding. Herved vil en række defekte eksemplarer blive frasorteret, inden komponenterne er kommet ud til brugerne.

typisk fejlhyppighed $1/20 \cdot 10^6$ h.

Glimmerkondensatorer. *Glimmer: kalium - Magnesium - Alu-silikater.*
Glimmer er et naturligt mineral, der har fremragende elektriske egenskaber.

Isolationsmodstand og gennemslagsspænding er meget høje, og da dielektricitetskonstanten er ca. 7, kan der fremstilles kondensatorer med relativt lille volumen. Temperaturkoefficienten er svagt positiv, ca. $30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Tabsfaktoren $\text{tg } \delta$ afhænger meget af renheden af det anvendte glimmer, men ligger op til meget høje frekvenser omkring $0,1 \cdot 10^{-3}$ for godt glimmer, som iøvrigt er temperaturbestandigt op til 600°C . Glimmer fremdrages fra naturen i blokke, som lader sig spalte i tynde glasklare plader, som på begge sider påbrændes et sølvlag, hvortil fastgøres terminaler. Man kan også stable flere glimmerskiver med sølvlag mellem, og derved få væsentlig større kapacitet. I alle tilfælde må kondensatorerne beskyttes mod indtrængende fugtighed, der kan nedsætte de gode egenskaber og eventuelt medvirke til, at glimmeret spaltes.

3. ELEKTROLYTKONDENSATORER.

Elektrolytkondensatorer er karakteriseret ved, at den ene elektode består af en elektrolyt, der kan være flydende eller tør (solid capacitor). Den anden elektrode består af enten aluminium eller tantal, og dielektrikummet består af henholdsvis aluminiumoxyd (Al_2O_3) eller tantaloxyd (Ta_2O_5). Den våde eller flydende elektrolyt består af en ledende væske, der ikke angriber metallet, medens den tørre elektrolyt består af en fast halvleder, i almindelighed brunsten (MnO_2). Elektrolytten kaldes katoden, og den metalliske elektrode anoden.

Al-elektrolytkondensatorer fremstilles både med flydende og tør elektrolyt. Det største antal af de første. Ta-elektrolytkondensatorer laves først og fremmest med fast elektrolyt og en sintret Ta-kærne som anode, men også med våd elektrolyt, både med sintret Ta-anode og med Ta-folie som anode.

Overgangen mellem metal og oxydlag har den egenskab at spærre for

strøm i den ene retning, hvorfor en elektrolytkondensator må påtrykkes en spænding i spærreretningen.

Al-elektrolytkondensatorer med våd elektrolyt.

Al_2O_3 -laget påføres et Al-folie ved en elektrolytisk proces (formeringen). Tykkelsen af oxyd-laget afhænger af den ved processen påtrykte spænding U_F , der vælges 20-40 % højere end kondensatorens højeste arbejds-spænding U_N . Oxyd-laget har en særdeles høj gennemslagsspænding og en relativ høj ϵ , se tabel 6,

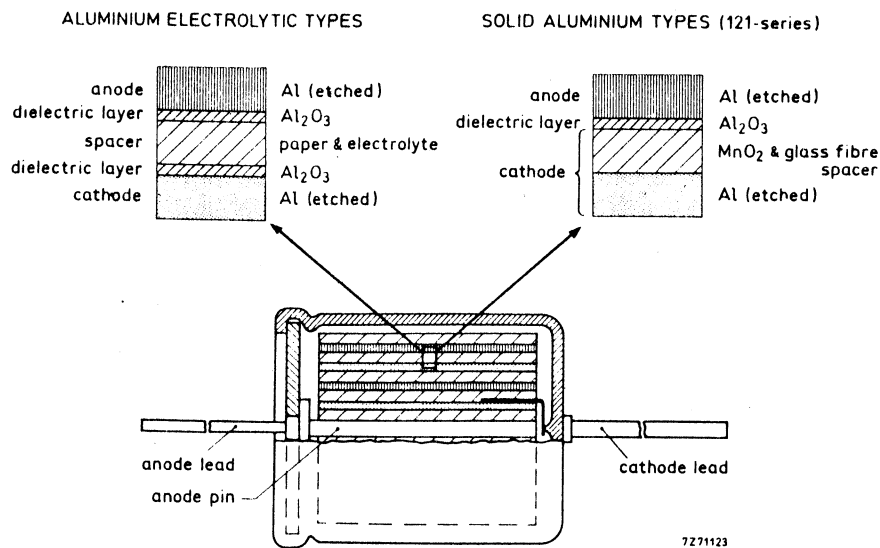
material	relative dielectric constant	physical limit of electrical field strength (V/m)
	(dimensionless)	
Al_2O_3	8	$7 \cdot 10^8$
Ta_2O_5	24	$5 \cdot 10^8$

Tabel 6.

hvorfor laget kan være meget tyndt ($< 1 \mu\text{m}$) og tilpasses nøjagtigt efter den ønskede arbejds-spænding. Dette bevirker, at man får en meget stor kapacitet pr. volumenenhed.

For yderligere at forøge kapaciteten ætser man hyppigt Al-foliet, så overfladen bliver meget større, og kapaciteten forøges herved 6-8 gange. Dog vil nogle andre af kondensatorens egenskaber herved forringes lidt.

For at få god elektrisk forbindelse til elektrolytten (katoden), lægges et andet Al-folie (som hyppigt kaldes katoden) ind i viklen, og imellem dette og oxydlaget lægges et porøst stykke papir, som opsuger elektrolytten. Den totale tykkelse af hele systemet er kun en brøkdel af en millimeter. Man vikler derfor lange strimler af systemet i et cylindrisk legeme, viklen, og lukker det inde i en Al-kapsel, se fig. 13.

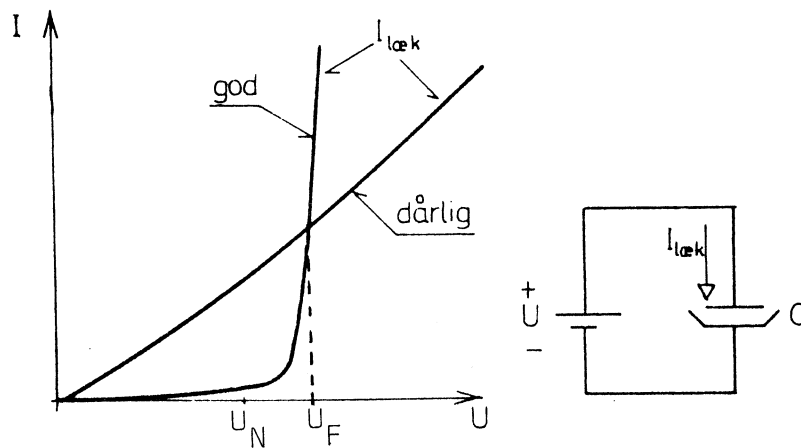


Figur 13.

Katode-foliet vil altid være dækket af et tyndt oxydlag, og der vil derfor også på katoden dannes en kapacitet, der ligger i serie med den egentlige. Katodekapaciteten er dog på grund af det meget tynde oxydlag så stor, at den ikke får betydning, hvis ikke oxydlaget gøres tykkere. Dette sker bl.a., hvis anode-potentialet bliver lavere end elektrolyttens, idet der samtidig gennem elektrolytten føres brintioner, der ved anoden frigøres som brint, der må have mulighed for at komme ud af indkapslingen for at undgå eksplosionsfare. Samtidig vil strømmen gennem kondensatoren stige stærkt og eventuelt forårsage, at kondensatoren ødelægges.

Skulle der være en mindre defekt i oxydlaget, vil en påtrykt spænding med rigtig polaritet virke selvhelende på samme måde som ved formeringen.

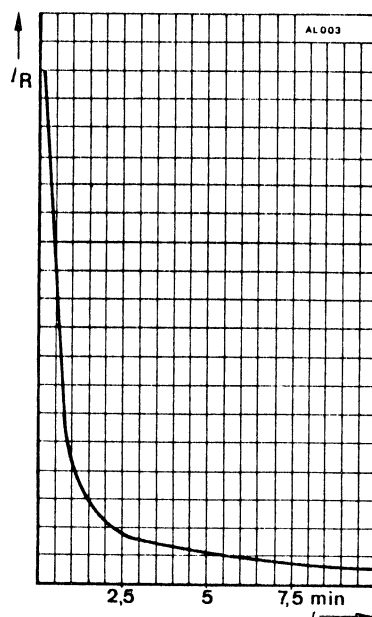
Når elektrolytkondensatoren udsættes for en jævnspænding U , vil der igennem den løbe en lækstrøm rettet fra anoden mod katoden. Lækstrømmen er afhængig af U og vil stige stejlt med spændingen, når U er blevet større end den højest tilladelige arbejdsspænding, mærkespændingen, U_N , se fig. 14.



Figur 14.

Undertiden vokser lækstrømmen jævnt med spændingen, og det er som regel tegn på, at anodefoliet ikke var rensat grundigt nok for jern og silicium før formeringen, samt at der er rester af klorioner i elektrolytten. Lækstrømmen bør holdes svag, da den vil forårsage fortsat formering af anodefoliet med fortykkelse af oxidlaget og dermed aftagende kapacitet til følge.

Oxidlaget omdannes, så isolationen falder, når kondensatoren henligger uden spænding i længere tid. Når kondensatoren atter sættes på spænding, vil der i den første tid løbe en stor lækstrøm, der dog vil falde til den oprindelige værdi, efterhånden som spærrelaget opformeres og genvinder isolationsevnen, se fig. 15. Lang tids lagring i høj temperatur vil give en meget højere lækstrøm.

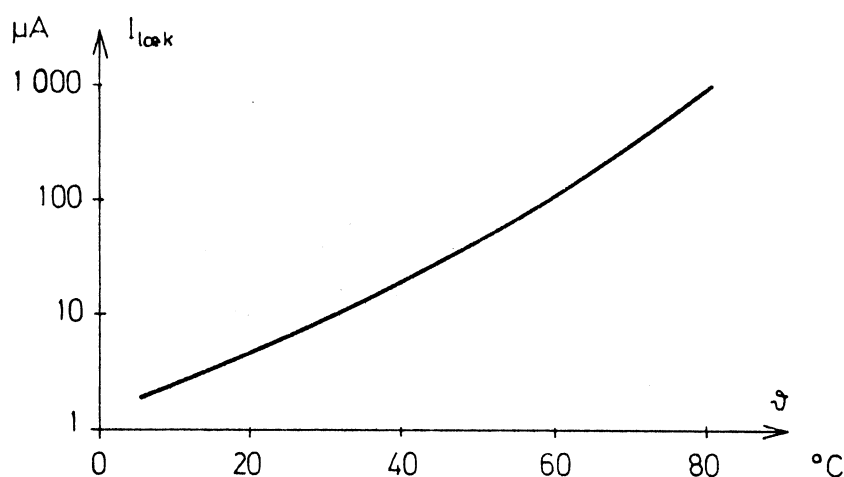


Abhängigkeit des Reststroms von der Zeit
Leakage current as a function of time

Figur 15.

Den store lækstrøm efter lagring kan føre til sammenbrud af oxidlaget som følge af lokal overophedning, inden formeringen er tilendebragt. Det er derfor hensigtsmæssigt at indkoble en modstand i serie med kondensatoren, når den sættes på spænding igen efter lagring.

Lækstrømmen vil være eksponentielt afhængig af temperaturen, og man vil få et forløb af den på figur 15 viste form.



Figur 15.

En høj arbejdstemperatur med deraf følgende stor lækstrøm vil føre til en betydelig reduktion af levetiden, idet man risikerer hot spot effekter og afdampning af elektrolytten.

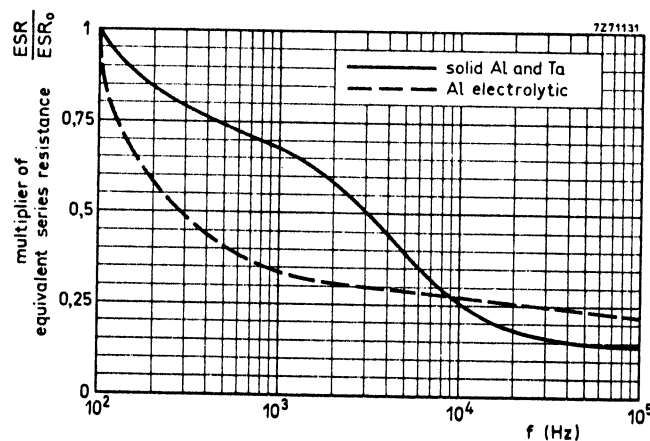
Når elektrolytkondensatorer anvendes til udglatningsformål, må man påse, at vekselstrømmen i kondensatoren begrænses, så overophedning undgås. Fabrikanterne opgiver i databladene, hvor stor effektivværdi rippelstrømmen må have ved forskellige frekvenser.

Dersom en elektrolytkondensator udsættes for stor rippelstrøm eller hyppige men kortvarige udladninger (blitzkondensator), kan man konstatere, at kondensatorens kapacitet aftager med tiden. Dette skyldes, at forskydningsstrømmen må passere elektrolytten som ledningsstrøm, så der i de negative halvperioder dannes et aluminiumoxidlag på katodefoliet, mens anodeoxidlaget gror i de positive halvperioder. Der sker med andre ord en yderligere formering af både anode og katode. Da processen ikke er reversibel, vil det således aflejrede oxid ikke opløses i de modsatte halvperioder,

og de to serieforbundne kapaciteter formindskes.

Man kan imidlertid også formere både anodefoliet og katodefoliet lige kraftigt, og kondensatoren kommer så til at bestå af to lige store kapaciteter i serie, d.v.s. man kan kun få den halve kapacitet i samme volumen. Til gengæld er det ved en sådan "bipolær" kondensator ligegyldigt, hvorledes spændingen poles, og man kan altså bruge kondensatoren til ren vekselspænding, men man må naturligvis også her sikre sig, at vekselstrømmen ikke overstiger den tilladte værdi.

En elektrolytkondensator har som andre kondensatorer både serie- og parallelmodstande samt selvinduktion svarende til ækvivalentdiagrammet fig. 6, side 6.



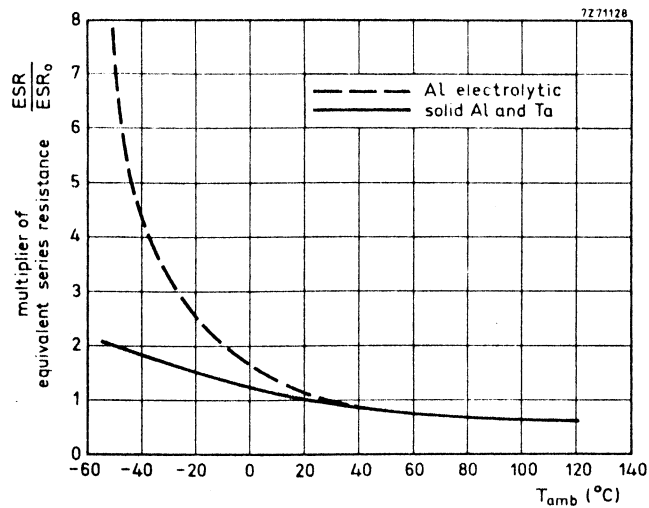
Typical ESR, as a function of frequency. $ESR_0 = ESR$ at $25^\circ C$, 100 Hz

Figur 16.

Seriemodstanden r_s hidrører væsentligst fra elektrolytten. I databøger angives normalt den ækvivalente seriemodstand (ESR), hvori både r_s og modstandene hidrørende fra lækstrømmen og de dielektriske tab er inkluderet. $ESR = \frac{tg\delta}{\omega_1 C_N}$, hvor C_N er kondensatorens nominelle værdi. ESR afhænger både af frekvens og temperatur, se fig. 16 og 17.

ESR falder med stigende frekvens, men $tg\delta$ stiger, da ESR ikke falder så meget, som ωC stiger.

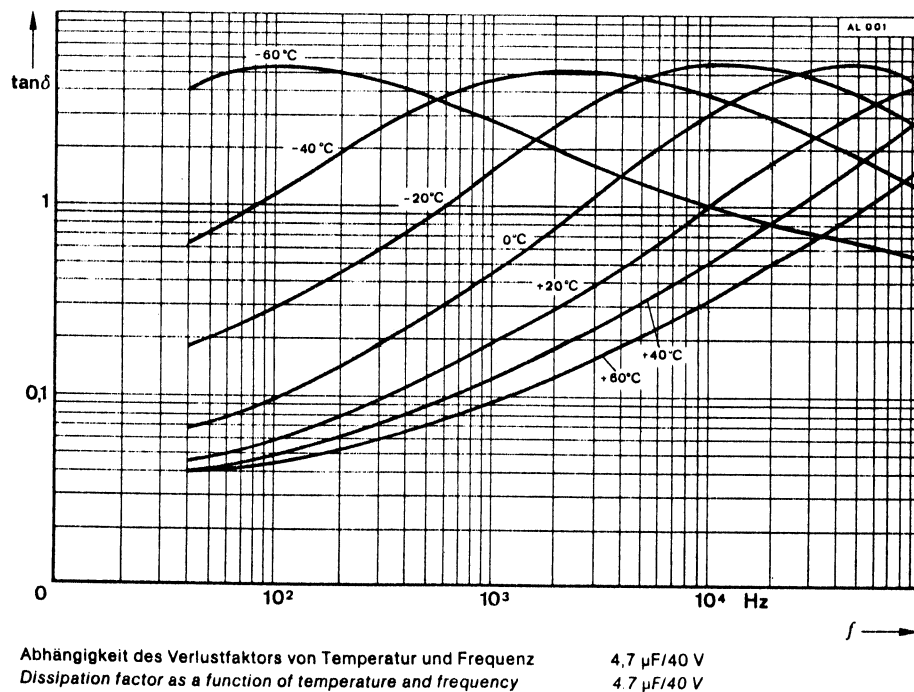
Dette gælder dog ikke ved meget lave temperaturer for våde Al-elektrolytkondensatorer, idet ESR her stiger meget kraftigt.



Typical ESR as a function of ambient temperature. ESR₀ = ESR at 100 Hz, at 25 °C

Figur 17.

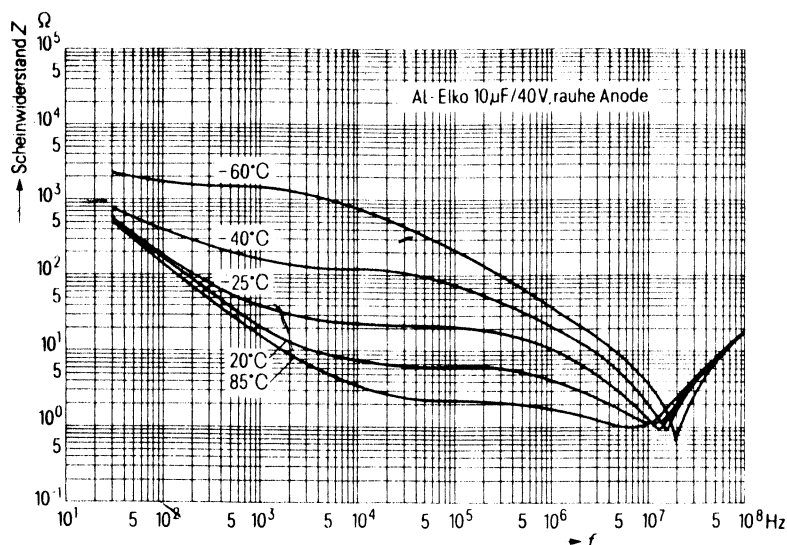
De samme forhold belyses af kurver, der viser $\tan \delta$ som funktion af temperatur og frekvens, fig. 18.



Figur 18.

Af kurver, der viser kondensatorens impedans som funktion af temperatur og frekvens, kan man se, ved hvilken frekvens impedansen ophører med at falde 20 dB pr. dekade, d.v.s. at seriemodstanden

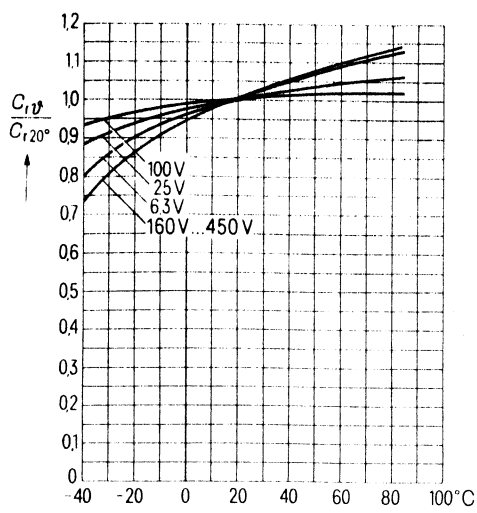
gør sig gældende. Ved endnu højere frekvens vil selvinduktionen gøre sig gældende, og impedanserne stiger. Se fig. 19.



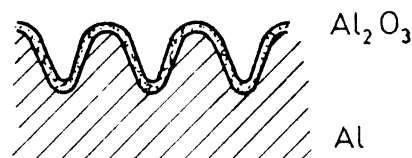
Figur 19.

Dette forklarer, hvorfor man ofte parallelt med en stor afkoblingselektrolytkondensator ser en mindre kondensator af anden type. $\tan \delta$ vil i ætsede kondensatorer være større end i kondensatorer med glat folie. Dette skyldes to forhold. Fig. 20 antyder et lille udsnit af et ætset folie. Man kan se, at ledningsstrømmen i elektrolytten må løbe ned til oxydlagets overflade i de snævre fordybninger i foliets overflade, hvilket fører til både forøgelse af ledningsvejenes længde og formindskelse af deres tværsnit.

Den væsentligste årsag til, at $\tan \delta$ er større i en ætset kondensator, skyldes dog, at kapaciteten med en given størrelse af Al-folierne er flere gange større, og dette ses klart af $\tan \delta = ESR \cdot \omega C$.



Figur 21.



Figur 20.

En elektrolytkondensators kapacitet afhænger temmelig meget af temperaturen. Denne afhængighed er i væsentlig grad forårsaget af, at elektrolyttens viskositet stiger med faldende temperatur og dens ledningsevne falder. Se fig. 21.

En elektrolytkondensators levetid er blandt andet bestemt af, om følgende parametre ændrer sig ud over specificerede grænser:

Kapaciteten
Tapsfaktoren $\tan \delta$
Impedansen
Lækstrømmen

De fleste af dem er direkte eller indirekte forårsaget af fejlme-kanismer, som optræder i elektrolytten. Den kan tørre ud eller der kan ske kemiske reaktioner. Sammensætningen af elektrolytten er derfor af vital betydning. Det er også væsentligt at undgå for høje temperaturer, der kan udtørre elektrolytten. Levetiden for-øges ofte til det dobbelte ved en nedsættelse af temperaturen med 10°C .

Benyttelse af kondensatoren ved en lavere spænding end den maxi-malt tilladelige U_N vil nedsætte lækstrømmen, hvilket betyder, at brintudviklingen vil nedsættes, og dermed forøges levetiden.

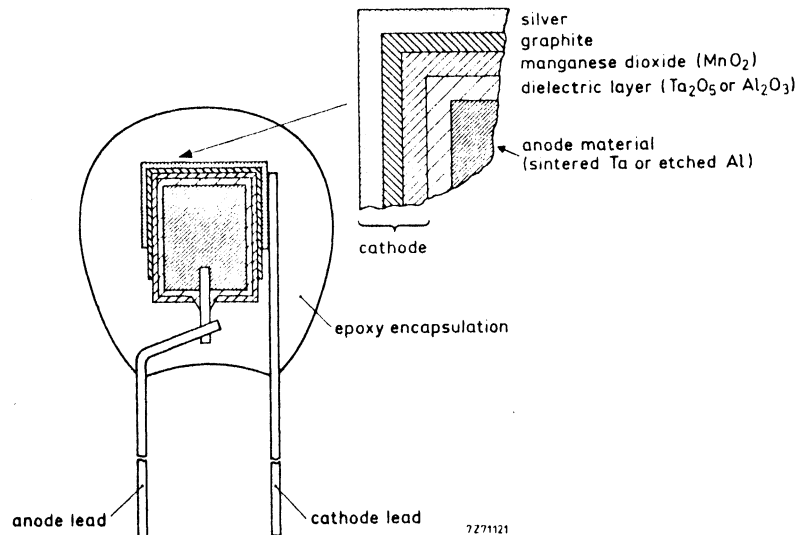
Al-elektrolytkondensatorer med tør elektrolyt.

Aluminiumelektrolytkondensatorer fremstilles også med en tør elek-trolyt. Herved er afdampning af elektrolyt og katodeformering ude-lukket. Endvidere får den betydeligt mindre ækvivalent seriemod-stand, som tillige er væsentlig mindre temperaturafhængig, hvil-ket gør denne kondensatortype anvendelig ved både lave og høje temperaturer. Til gengæld har en tør elektrolytkondensator ikke selvhelende egenskaber, og dens lækstrøm er større end den våde types. Driftspændingen må derfor holdes væsentlig lavere end gen-nemslagsspændingen. Bægeret må være fugttæt, da indtrængende fugt virker nedbrydende på kondensatorens egenskaber.

Opbygningen af en sådan solid capacitor ses på fig. 13, side 26.

Denne type kondensator kan principielt tåle, at katoden er posi-tiv i forhold til anoden, men da lækstrømmen ikke her udøver en selvhelende virkning, er det af hensyn til en eventuelt mindre mængde fugtighed tilrådeligt at holde anoden positiv i forhold til katoden.

Elektrolytkondensatorer med tør elektrolyt fremstilles også i dråbeform og i så fald er opbygningen som vist i fig. 22. Dette system bruges også for dråbeformede tantalelektrolytkondensatorer.



Figur 22.

Tantal-elektrolytkondensatorer med tør elektrolyt.

I denne type kondensatorer består anoden af et cylindrisk legeme, der først er presset sammen af tantalpulver om en tantaltråd og derefter sintret ved høj temperatur under vacuum. Det sintrede legeme er porøs og svampelignende og har en meget stor overflade. Ved en elektrokemisk proces frembringes på overfladen et oxydlag Ta_2O_5 . Tantaloxyds dielektricitetskonstant er meget stor, omkring 24, se tabel 6, side 25.

Tykkelsen bestemmes som ved Al-kondensatorer af arbejdsspændingen. Elektrolytten, brunsten MnO_2 , frembringes ved, at anoden imprægneres med et mangansalt, og ved en varmebehandling dannes MnO_2 . Forbindelse fra elektrolytten sker gennem først et grafitlag og udenpå findes et sølvlag, hvorpå loddet katodeledningen.

På flere punkter er tantalelektrolytkondensatoren Al-kondensatoren overlegen. Den er mindre, da ϵ_r er større. Lækstrømmen er væsentlig mindre. Lavtemperateregenskaberne overgår alle andre typer, idet den kan arbejde helt ned til -60°C . Dens stabilitet efter lagring er bedre end for alle andre elektrolytkondensatorer.

Den tørre tantalkondensators egenskaber er i forhold til den våde tantalkondensators omtrent som omtalt under Al-elektrolytkondensatorer med tør elektrolyt.

Tantalelektrolytkondensatorer med tør elektrolyt fremstilles i forskellige udformninger: Indkapslet i cylindrisk aluminiumbæger, i dråbeform, indstøbt i epoxy og også som chip-kondensator, d.v.s. som en lille flad rektangulær skive, der er beregnet til ilodning i f.eks. tykfilmkredsløb.

En grov oversigt over nogle af de forskellige kondensatortypers volumen som funktion af produktet af kapacitet og arbejds-spænding er vist på fig. 23 og kan være til nytte ved valg af kondensatortype.

A GRAPH DEPICTING THE RELATIONSHIP OF TANTALUM ELECTROLYTICS TO OTHER DIELECTRICS, IN TERMS OF VOLUME DISPLACED BY THE COMPLETED CAPACITOR, VERSUS THEIR CAPACITANCE-RATED VOLTAGE PRODUCT.

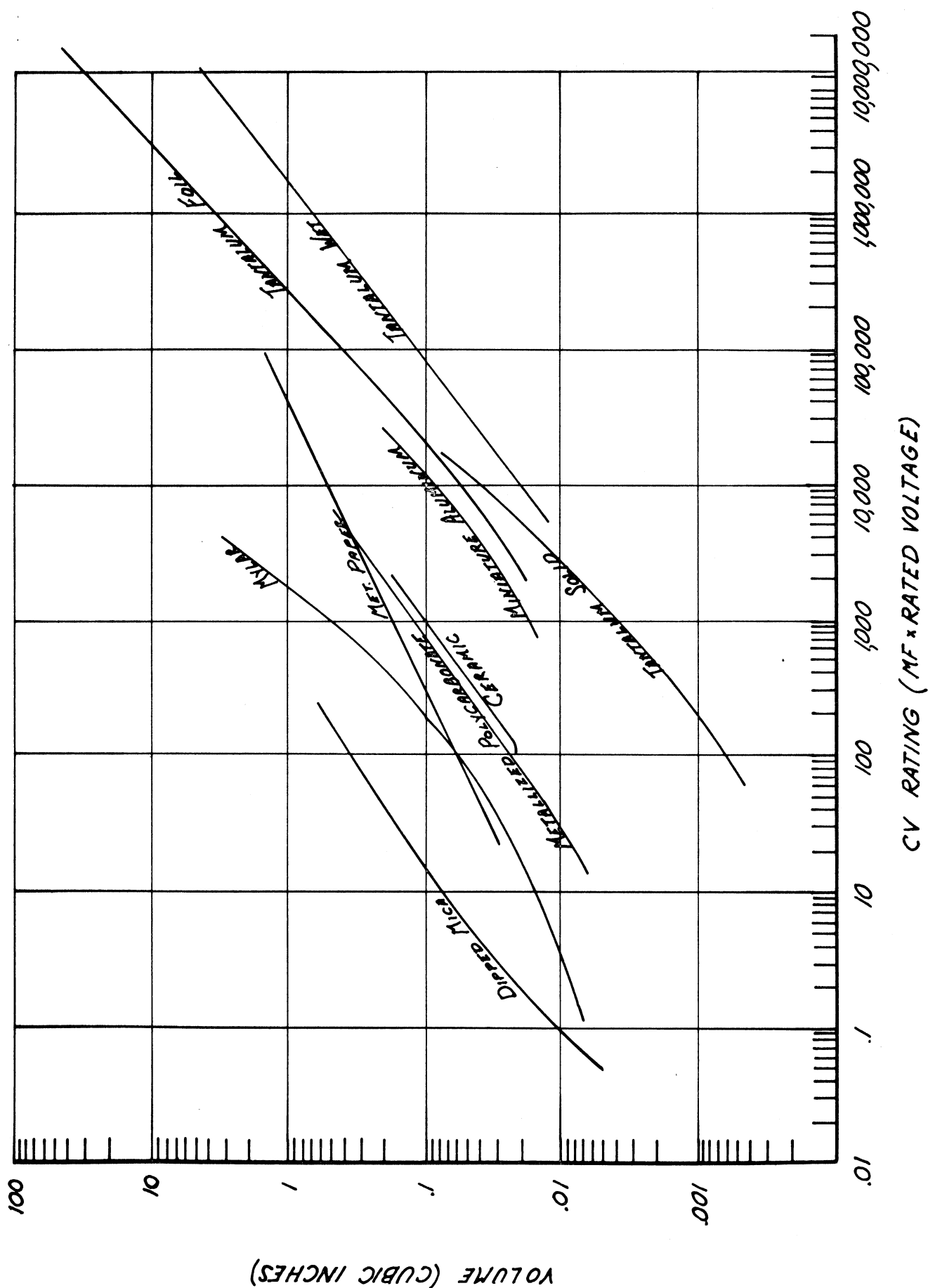


Figure 23.

4. VARIABLE KONDENSATORER.

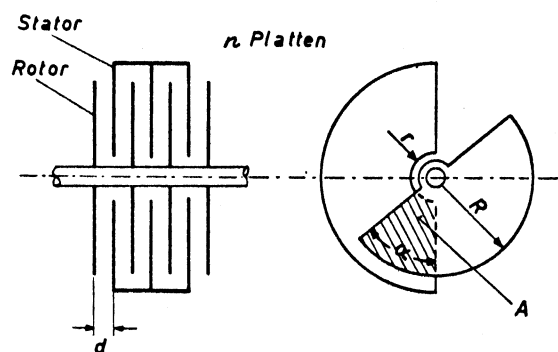
Variable kondensatorer har som dielektrikum luft, keramik eller plast. Variation af det effektive elektrodeareal medfører den ønskede kapacitetsvariation. De anvendes til afstemning af svingningskredse, filtre og lignende.

I nutidig design anvendes meget ofte kapacitetsdioder, varactor-dioder, til afstemningsformål, typiske værdier: 5 - 150 pF.

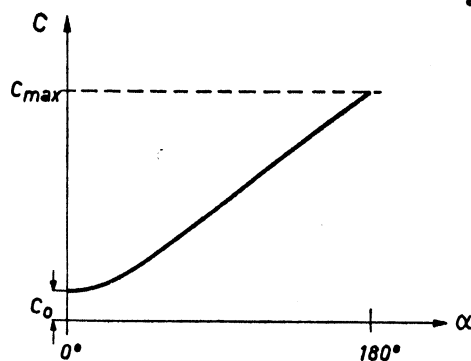
Man skelner mellem drejekondensatorer og trimmekondensatorer, hvor de sidstnævnte er beregnet til indjustering og derefter ikke varieres.

Drejekondensatorer er hyppigst luftkondensatorer med et sæt fastmonterede statorplader og et sæt rotorplader, som kan drejes ind mellem statorpladerne. Ved at ændre på pladernes facon, kan man fremstille kondensatorer, hvis kapacitetsvariation som funktion af drejningsvinklen er forskellig.

Halvcirkelformede plader giver en lineær kapacitetsændring, fig. 24.



a)

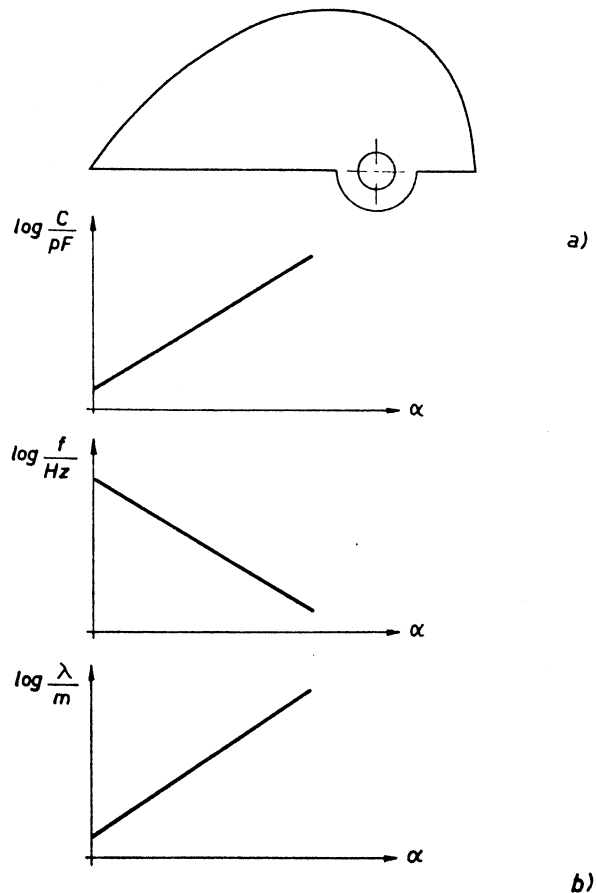


b)

Prinzip des Kreisplattenkondensators
a) Aufbau, b) Kapazitätsverlauf

Figur 24.

En hyppig anvendt type giver et logaritmisk forhold mellem kapacitet og drejningsvinkel, fig. 25.



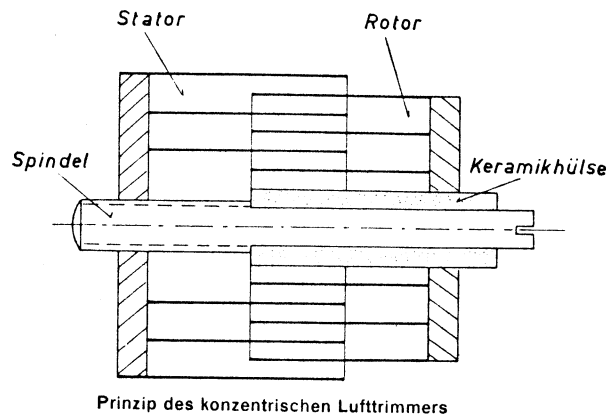
Logarithmischer Kondensator
a) Plattenschnitt des Rotors, b) Verlauf von Kapazität, Frequenz und Wellenlänge

Figur 25.

Drejekondensatorer fremstilles med 1-4 kondensatorer (flergangskondensatorer), der går på samme akse. Kapacitetsvariationen er normalt maksimalt ca. 500 pF.

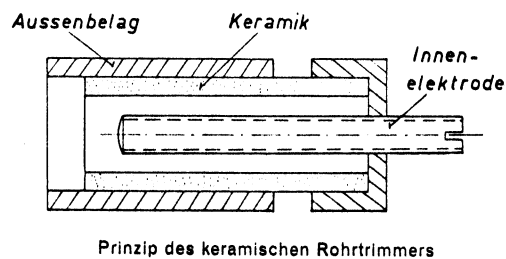
Trimmekondensatorer.

Trimmekondensatorer kan også laves med luft som dielektrikum, f.eks. som miniature-drejekondensatorer eller med koncentriske rør, som skrues ind i hinanden, se fig. 26.



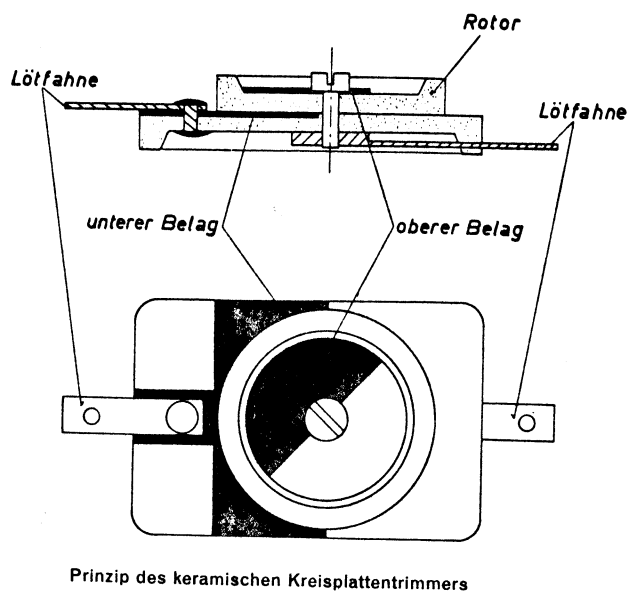
Figur 26.

Princippet i keramiske rørtrimmere ses af fig. 27.



Figur 27.

Keramiske trimmere laves også med en drejelig keramiskskive som vist i fig. 28.



Figur 28.

Trimmere med plast som dielektrikum laves oftest som små drejekondensatorer med plastfolie mellem pladerne. Som dielektrikum anvendes polyethylen, polypropolen eller polycarbonat og for høje temperaturer polyetrafluorethen (teflon). Diameteren af trimmerne varierer fra 3 - 10 mm.

Trimmere laves med største kapacitet fra få pF op til ca. 100 pF.

5. PÅLIDELIGHED AF KONDENSATORER.

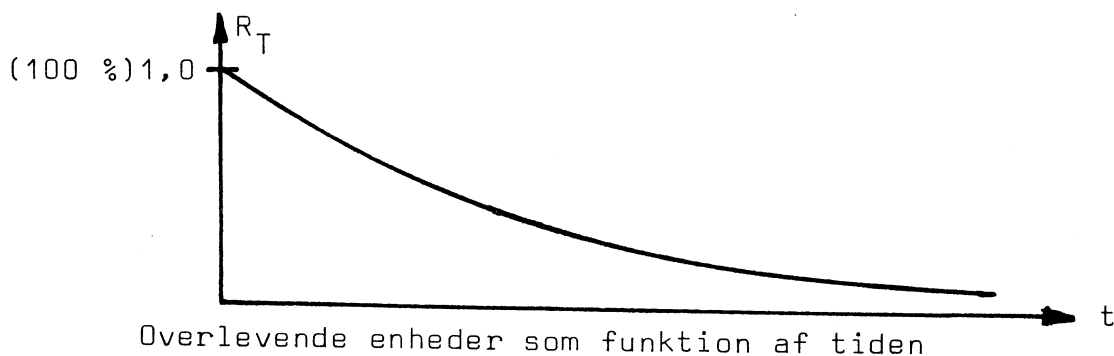
Pålidelighedsbegrebet anvendes både i forbindelse med hele apparater, apparatenheder og enkelte komponenter og baseres på følgende fastlagte begreber:

Pålidelighed = sandsynlighed for succes, eller pålidelighed er sandsynligheden for, at en enhed overholder sine specifikationer i et forudbestemt tidsrum og miljø.

Antal overlevende enheder R som funktion af tiden eller sagt på en anden måde: Sandsynligheden for, at en enhed dør til tidspunktet t eller senere, kan udtrykkes ved overlevelsesfunktionen $R_T = f(t)$

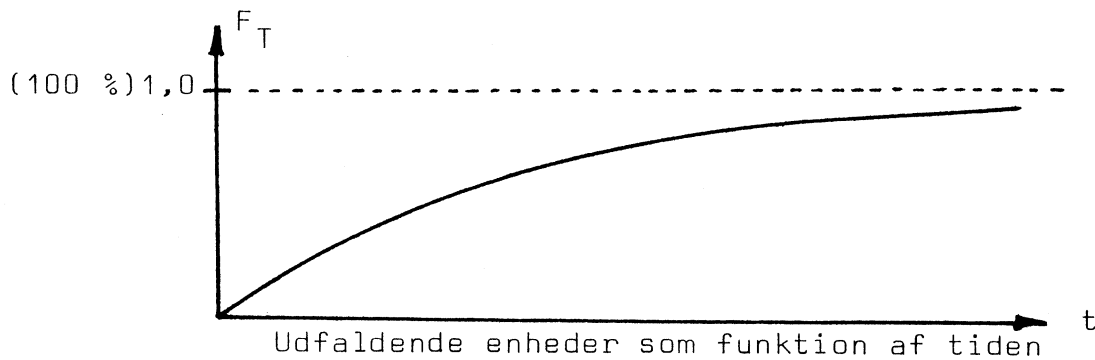
$$R_T(t) = e^{-\lambda t} = P(T \geq t)$$

hvor λ = fejlhyppighed (failure rate) $\left| \frac{\text{fejl}}{\text{tidsenh.}} \right|$
 t = missionstid (brugstid)
 T = enhedens levetid og
 P står for probability



Fordelingsfunktionen $F_T(t)$ eller sandsynligheden for, at en enhed dør til tidspunktet t eller tidligere, kan udtrykkes ved

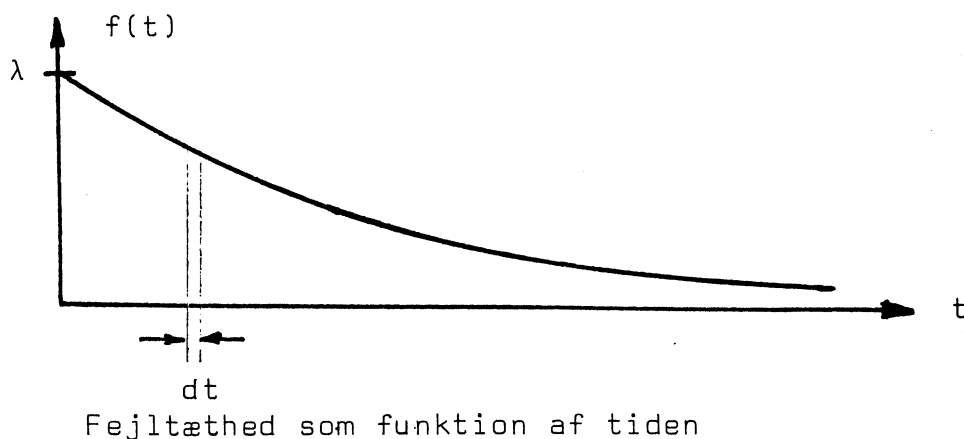
$$F_T(t) = 1 - R_T(t) = 1 - e^{-\lambda t} = P(T \leq t)$$



Tæthedsfunktionen $f(t)$ eller frekvensfunktionen kan udtrykkes ved

$$f(t) = F'_T(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

hvor $f(t) \cdot dt = P(t \leq T \leq t+dt)$ er sandsynligheden for, at en enhed dør i tidsrummet dt .



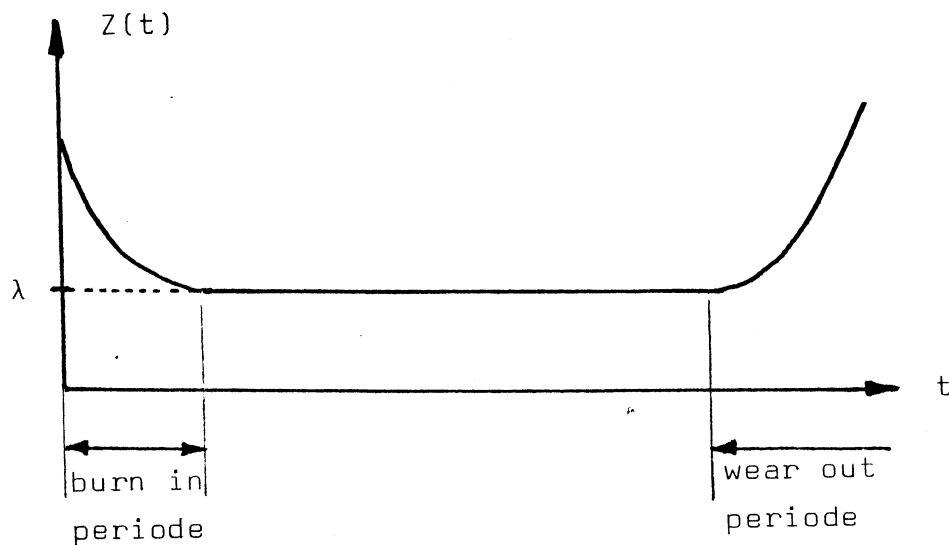
Fejlhyppigheden $Z(t)$ angiver sandsynligheden for, at en enhed, der endnu lever, dør i det næstfølgende tidsrum

$$Z(t) = \frac{f(t)}{R_T(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda$$

Her forudsættes λ konstant for en given enhed i hele levetiden. Dette holder dog ikke i praksis, idet $Z(t)$ blandt andet er en

funktion af enhedens alder og af miljø og belastning.

Den praktiske kurve for $Z(t)$ fører derfor ofte til "badekarskurven".



Fejlhyppighed som funktion af tiden.

I dette afsnit vil vi omtale de væsentligste størrelser, som er bestemmende for en kondensators fejlhyppighed. Talmaterialet må kun betragtes som vejledende, da alle elektronikkomponenter stadig udvikles til større og større pålidelighed for at gøre det muligt at fremstille kompliceret elektronikudstyr med en rimelig pålidelighed.

Da kondensatorer er mere komplicerede komponenter end faste ikke trådviklede modstande, må man forvente større fejlhyppigheder for kondensatorer end for modstande.

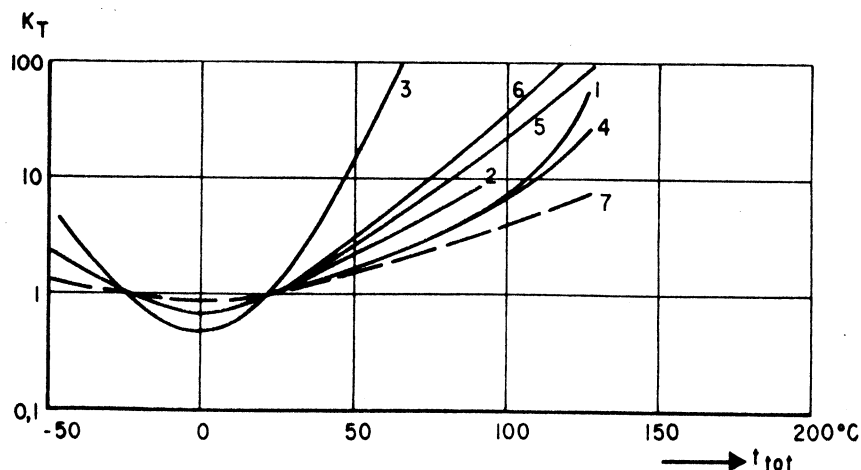
I tabel 7 er grundfejlhyppigheden $Z(t)$ opført for faste kondensatorer isoleret med dielektrika, der ikke er frembragt ved elektrolyse.

Dielektrikum	Grundfelintensitet	
	$z/10^6h$	gäller vid $U = 100\%$ och
Papper-olje	0,002—0,1	0—40°C
MP	0,003—0,2	0—40°C
Papper-polyester ..	0,0001—0,1	0—40°C
Polyester	0,001—0,2	0—40°C
Polystyrol	0,01—0,1	10—20°C
Polykarbonat ...	0,002—0,1	0—40°C
Cell.acetat	0,005—0,5	10—30°C
Keramik, låg ϵ ..	0,001—0,01	10—30°C
Keramik, hög ϵ ..	0,01—0,8	10—25°C
Silverglimmer ...	0,001—0,05	0—40°C
Glas	0,002—0,1	10—25°C
Porslin	0,001—0,05	10—25°C

Tabel 7.

Ved den aktuelle anvendelse af kondensatoren bliver fejlhyppigheden normalt væsentlig større end grundfejlhyppigheden, idet man må multiplicere grundfejlhyppigheden med produktet af tre multiplikationsfaktorer, $K_F \cdot K_T \cdot K_S$.

K_F angiver, hvor meget fejlhyppigheden vokser, dersom man skærper kravet til kondensatorens stabilitet. Det ses, at polystyren i denne henseende er det pålideligste dielektrikum. Se tabel 8 side 43.

Multiplikationsfaktor K_T som funktion av totaltemperatur.

Kurva 1 Papper, MP
2 Cellulosaacetat
3 Polystyrol
4 Polyester, polykarbonat

5 Keramik, låg ϵ
6 Keramik, hög ϵ , glas, porslin
7 Silverglimmer

Figur 29.

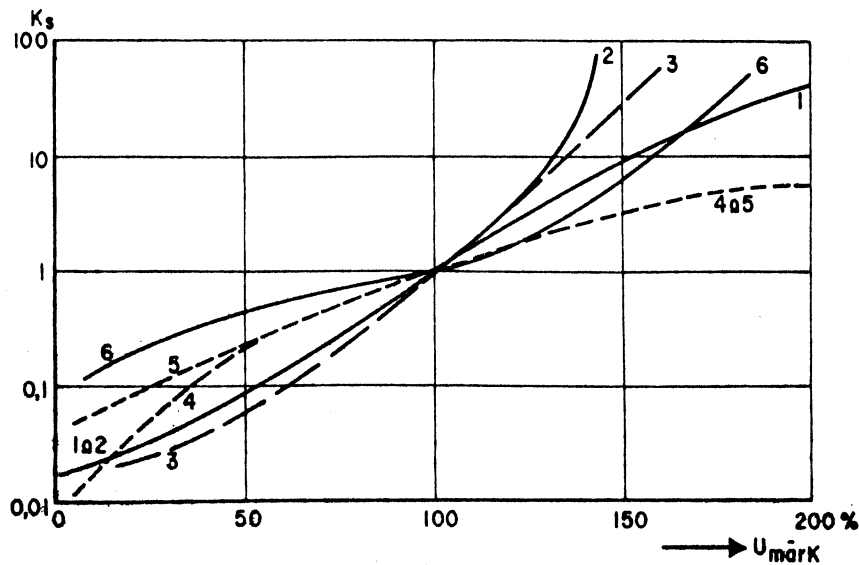
På figur 29 er multiplikationsfaktoren K_T vist som funktion af temperaturen. Den angiver, hvor meget fejlhyppigheden vokser, når kondensatorens temperatur afviger fra 20°C. Det ses, at

Dielektrikum	Multiplikationsfaktor K_F						
	Feldefinition $\Delta C \%$						
	100	30	10	3	1	0,3	0,1
Papper	1	1	2	10	100		
MP	1	1	2	3	20		
Papper-polyester	1	1	2	5	50		
Polyester	1	1	2	2	10	100	
Polystyrol	1	1	1	1	2	3	10
Polykarbonat	1	1	1	2	8	60	
Cellulosa-acetat	1	1	2	5	60		
Keramik, låg ϵ	1	1	1	2	3	7	100
Keramik, høj ϵ	1	2	10	100			
Silverglimmer	1	1	1	1	2	3	20
Glas	1	1	1	2	3	10	100
Porslin	1	1	1	2	3	7	60

Tabel 8.

både lave og høje temperaturer øges fejlhyppigheden, samt at forsølvet glimmer i denne henseende er det bedste dielektrikum. Vi ser også, at polystyren både svigter ved lav og høj temperatur. Polystyren har lav blødgøringsstemperatur, og det bliver skørt ved lave temperaturer.

På figur 30 er multiplikationsfaktoren K_s vist. Den angiver, hvor mange gange fejlhyppigheden vokser som funktion af forholdet imellem den aktuelle spænding over kondensatoren og dennes mærkespænding. I denne henseende ser man, at keramikkondensatorer er meget gunstige selv ved dobbelt mærkespænding, mens metalpapirkondensatorer allerede ved 40% overspænding giver ca. 100 gange større fejlhyppighed. Dette bekræfter, at man ved fremstillingen lægger mærkespændingen nær ved gennemslagsspændingen som følge af denne types selvhelende egenskab.



Multiplikationsfaktor K_S som funktion av normaliserad driftspänning.

Kurva 1 Papper, polyester

2 MP, metalliserad plast

3 Polystyrol, cellulosaaacetat

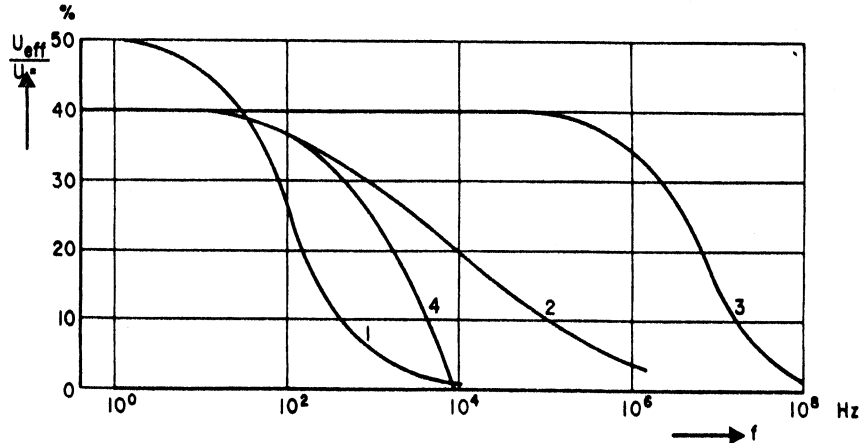
4 Keramik låg ϵ , silverglimmer

5 Keramik hög ϵ

6 Porslin, glas

Figur 30.

Som et eksempel på brugsegenskaber, er i figur 31 vist forholdet imellem effektivværdien af vekselspændingen og mærkejævnspændingen som funktion af frekvensen ved konstant fejlhyppighed.



Figur 31.

Växelspänning/märklikspänning $U_{eff}/U_0 =$ som funktion av frekvens för konstant felintensitet. Dessa värden gäller endast under 25°C. Däröver bör de reduceras lineärt till 0,3 av angivna värden vid max tillåten temperatur.

Kurva 1 Papper MP

2 Polyester, polykarbonat,
keramik-hög ϵ

3 Polystyrol, glimmer, keramik-

låg ϵ , glas

4 Torrtantal

Ved lave frekvenser er papir- og metalpapirkondensatorer overlegne, mens polystyren, glimmer og keramik på afgørende måde markerer sig ved høje frekvenser som følge af disse dielektrikas lave tabsfaktorer.

Et lignende materiale findes for elektrolytkondensatorer i f.eks.: T.G. Charles: Tilførlitlighet elektronikkomponenter, instituttet för rationel utbildning AB., Box 950, 18109 Lidingö 9.

I den lige omtalte figur 31 kan man se, hvorledes tantalkondensatorer med tør elektrolyt opfører sig, når de udsættes for overlejet vekselspænding. Man ser, at ved en frekvens på 1000 Hz, er disse kondensatorer papirkondensatorerne langt overlegne (25 mod 6 %). Pålidelighedsdata for elektrolytkondensatorer kunne principielt behandles analogt med de oven for omtalte typers data. Som nævnt i indledningen udvikles komponenternes egenskaber så hurtigt, at det i en vurderingssituation vil være hensigtsmæssigt at indhente friske data.

6. LITTERATUR.

1. Otto Zinke: Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe.
2. N. Balslev: Elektroteknisk materiallære.
3. DIA: Material- og komponentlære.
4. Miniwatt data handbook: Components and materials.
5. Simens Datenbuchs: Kondensatoren.
6. AEG-Telefunken Datenbuchs: Kondensatoren.
7. Dabowski: Bauelemente der Elektronik.