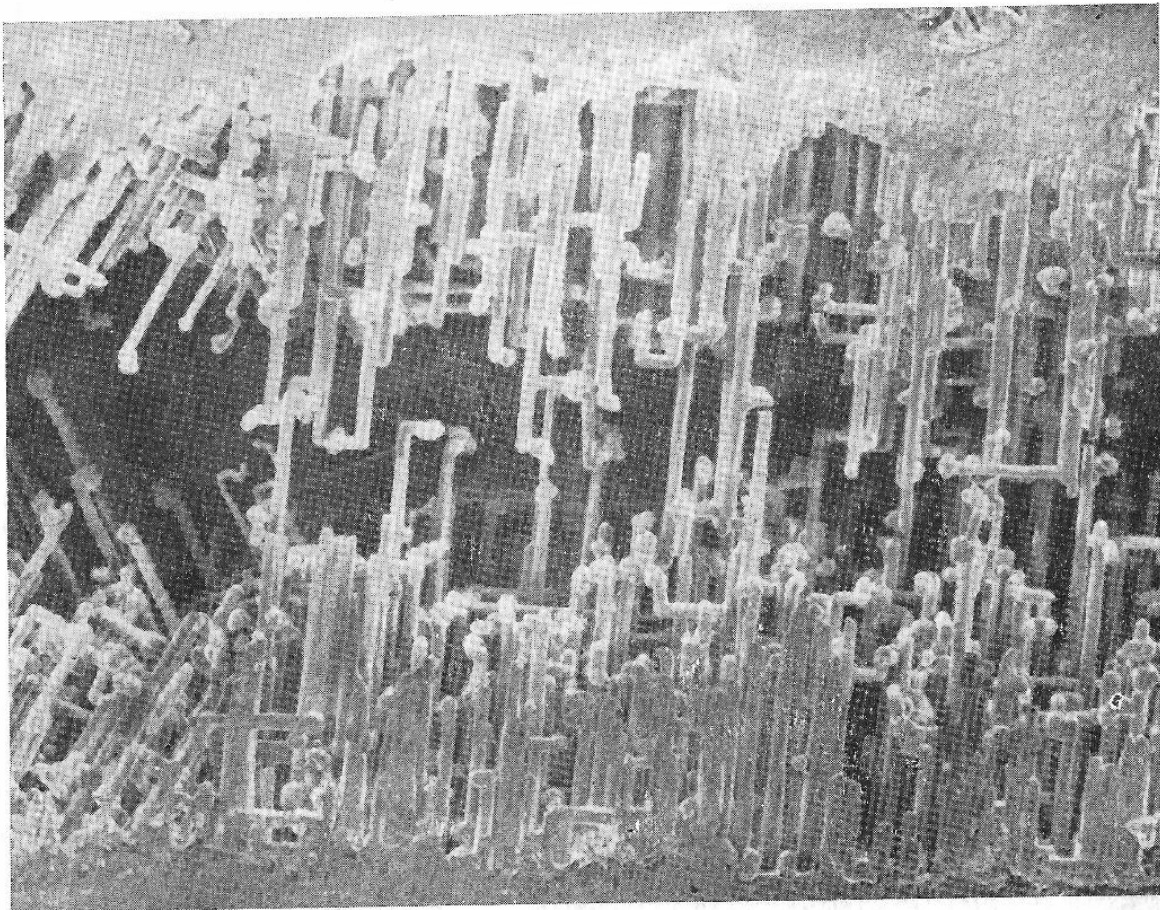


VEB Kombinat Elektronische Bauelemente Teltow
Arbeitsausschuß Kondensatoren der Kammer der Technik

BERICHTSBAND
ZUR
1. FACHTAGUNG

„Bauelementefunktion elektrischer Kondensatoren“



25. und 26. März 1980 · Karl-Marx-Stadt

STAND UND ENTWICKLUNGSTREND ELEKTRISCHER KONDENSATOREN

Dr. sc. nat. Hans-Dieter Langer

Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt

Die Entwicklung der Kondensatoren war stets Bestandteil der Gesamtentwicklung der Elektronik. Aus historischer Sicht muß **man allerdings feststellen, daß** mit Erfindung der Leydener Flasche im Jahr 1745 der erste Luftkondensator die Elektronikentwicklung eigentlich erst einleitete, wenn auch die Elektronikanwendung noch sehr lange auf sich warten ließ.

In heutiger Zeit wird die Innovationsrate maßgeblich durch Fortschritte auf dem Gebiet der aktiven Bauelemente, genauer **der monolithischen integrierten** Schaltkreise bestimmt. Diese Rolle hatten bereits im Jahr 1948 die diskreten Halbleiterbauelemente übernommen als beispielsweise Mitte der fünfziger Jahre der Tantalkondensator mit einer für Elektrolytkondensatoren damals ungewöhnlichen Festelektrolyt-Konzeption einen hohen Marktanteil innerhalb kürzester Frist **eroberte**.

Auch die Hybridtechnik mit ihren typischen Varianten der Dünn- und Dickschichtschaltungen auf Isolatorsubstrat sowie neuerdings in verstärktem Maß die Leiterplattentechnik mit starren bzw. flexiblen Kunststoffsubstraten und die Mikromodultechnik stellen erhöhte Anforderungen an die Baugruppenintegration mit entsprechenden Anforderungscharakteristiken für die diskreten Bauelemente. Dabei vollzieht sich ein Übergang von bedrahteten zu Chipbauelementen, die vorzugsweise ohne Anschlußdrähte konstruiert sind. Längst ist es auch selbstverständliche Praxis, Kondensatoren ebenso wie andere passive Bauelemente direkt und - im Gegensatz zu den stets vorhandenen parasitären Kapazitäten - beabsichtigt in allen gebräuchlichen integrierten Schaltkreisformen konstruktiv und technologisch zu realisieren. Es dominiert hierbei die Plattenkondensator-Konstruktion.

In der Leistungs- und Höchstleistungselektronik bestimmen nach wie vor diskrete Kondensatoren, die allerdings oft in einem Gehäuse zu Baugruppen zusammengefaßt sind, das Bild. Auch hier bestehen hohe Anforderungen an die funktionsbestimmenden Werkstoffe und die Kondensatorkonstruktion. Probleme der Materialökonomie und des Umweltschutzes stehen dabei im Vordergrund.

In letzter Zeit haben sich spezielle Zweige der Elektronik wie die Opto-, Akusto-, Magneto-, Kryoelektronik zu schon beinahe eigenständigen technischen Disziplinen entwickelt. Sie stellen ebenso wie die Sensortechnik und andere Richtungen zunehmend spezialisierte Anforderungen. Dadurch werden z. T. ungeahnte Innovationsimpulse gerade in Bezug auf Kondensatorbauelemente ausgelöst. Als Beispiel seien genannt die interdigitalen Wandler, die in akustoelektronischen Oberflächenwellen-Bauelementen, basierend auf kammartigen Kondensatorstrukturen, eine zentrale Rolle spielen. Ebenwo fundamental ist das Josephson-Bauelement in der Kryotechnik, das ein Funktionsprinzip des Kondensators nutzt, nämlich die Ladungsträgerdurchtunnelung eines extrem dünnen Dielektrikums (2 bis 10 nm) infolge des elektrischen Feldes zwischen den Kondensatorplatten. Formen des stabilen elektrischen Durchschlages zwischen teilweise lichtdurchlässigen Kondensatorelektroden wendet man bei der Realisierung von Festkörperdisplays an, die in nicht allzu ferner Zeit die Bildröhre substituieren werden. Die Sonderbauformen von Kondensatoren sind gegenwärtig bereits äußerst vielfältig und können daher an dieser Stelle nicht weiter Gegenstand der Erörterung sein. Unmittelbarer Ausdruck für die Bedeutung verschiedener diskreter Kondensatorgruppen auf dem Elektronik-Markt ist das Umsatzwachstum der letzten Jahre in den USA, das in Bild 1 den entsprechenden Zahlen für diskrete Halbleiterbauelemente und integrierte Schaltkreise gegenübergestellt wurde. Diese Grafik ist aber nur teilweise repräsentativ für den Weltmarkt. Es bestehen, wie aus Bild 2 hervorgeht, einige spezifische Unterschiede und Besonderheiten, schon wenn man die drei Marktsphären USA, Europa und Japan miteinander vergleicht. Welches sind nun die wesentlichen Innovationsquellen der Kondensatorentwicklung?

Auch hier soll zunächst ein historischer Überblick einige Ansatzpunkte liefern:

1900 bis 1910

Die Wechselstrom-Elektrotechnik befindet sich in den Anfängen, wobei der Fortschritt durch solche Entdeckungen wie die der Vakuumdiode (1904) und der Vakuumtriode (1906) erkennbar bestimmt wird. Die Kapazität von vorhandenen Papier- und Glimmer-

kondensatoren zur Realisierung der Glättungsfunktion reicht nicht aus. Der Aluminium-Elektrolytkondensator mit flüssigem Elektrolyt verspricht die entstandene Lücke zu füllen.

1910 bis 1920

Es ist vor allem die rohrengestützte Nachrichtentechnik im Radiowellenbereich für militärische Zwecke, die infolge eines sprunghaft steigenden Bedarfs zur Entwicklung einer spezialisierten Kondensatorenindustrie beiträgt.

1920 bis 1930

Während die Leistungstechnik bereits hohe Anforderungen an Kondensatoren zur Verlustleistungskompensation in Übertragungsnetzen stellt, tritt die Meßtechnik mit ihren speziellen Anforderungen an die Kondensatorfunktion in Erscheinung. Die Kondensatorenindustrie geht zur Massenproduktion über.

1930 bis 1940

Die Elektronik dringt in den Hochfrequenzbereich vor, was die Entwicklung der Keramik-Kondensatoren fördert. Wesentlich ist für die gesamte Elektrotechnik/Elektronik eine zunehmende wissenschaftliche Fundierung, was auch zu weiter spezialisierten Forderungen an Kondensatoren führt.

1940 bis 1950

Basierend auf den Erfahrungen der rohrengestützten Radioelektronik in den Kriegsjahren und der Energieübertragungstechnik steigen die Stabilitätsanforderungen an Kondensatoren ganz erheblich. Immer speziellere Charakteristiken (insbesondere niedrige Verluste, geringe Induktivitäten) leiten sich für Kondensatoren aus der Impulstechnik ab.

1950 bis 1960

Eine schnelle Entwicklung der diskreten Halbleiterelektronik verlangt die Bereitstellung von Kondensatoren kleiner Abmessungen und niedriger Betriebsspannung. Die Miniaturisierung ist seither ein untrennbares Kriterium der gesamten Schwachstromelektronik.

1960 bis 1970

Schon kurz nach dem Geburtsjahr (1957) der monolithischen Festkörperschaltkreise werden die erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen erkannt, die im Gefolge auch an die Kondensatoren zu

stellen sind. Während eine weitere Abnahme der Spannungs- und Leistungspegel zu verzeichnen ist, fördert die an Bedeutung zunehmende Halbleiter-Leistungselektronik die Weiterentwicklung von Kondensatoren für den Hochvolt- und den Starkstrombereich.
1970 bis 1980

Einen stürmischen Aufschwung erfährt die Mikroelektronik auf der Basis integrierter Halbleiter- und Hybridschaltkreise. Damit einher gehen Fortschritte im Kondensatorbereich vor allem bezüglich der Miniaturisierung, der Zuverlässigkeit und der von parasitären Elementen möglichst freien Konstruktion. Die Chip-Konstruktion wird realisiert. Zum Teil neuartige Anforderungen entstehen infolge der sprunghaft zunehmenden Bedeutung des Umweltschutzes (betrifft vor allem Leistungskondensatoren) und der Materialökonomie, wovon Bauelemente niedriger wie hoher Leistung gleichermaßen betroffen sind.

1980 bis 1990

Die Realisierung immer komplexerer Funktionen, z. B. in der Steuerungs- oder in der Phono- bzw. Fernsehtechnik, ist ein typisches Merkmal heutiger Anwendungstechnik, was die konstruktive Spezialisierung der Bauelemente fördert. Im Herstellerbereich von Kondensatoren werden u. a. bedeutende Maßnahmen der Materialsubstitution wirksam. Chip-Bauelemente revolutionieren die Leiterplattentechnik. Ein Wesensmerkmal ist die Automatisierung der Bauelementeherstellung und der Leiterplatten- bzw. Hybridschaltkreisbestückung. Neue Werkstoffe und Technologien sichern den Fortbestand einzelner Kondensatorgruppen. Das ist unmittelbar Ausdruck für den hohen Spezialisierungsgrad der Anwendung. Es gibt nämlich keine Kondensatorgruppe, die den Betriebseigenschaftsbereich einer anderen Gruppe vollständig überdeckt. Dadurch sind die verschiedenen Kondensatorgruppen zumindest unter dem Gesichtspunkt einzelner Parameter unersetzlich. Eine gewichtige, aber nicht immer entscheidende Rolle spielt in diesem Zusammenhang selbstverständlich auch die Ökonomie. Die Einführung der Stapeltechnik hat den Keramik- wie den Glimmerkondensatoren ein "come back" beschert. Es ist vor allem die Chip-Einbauweise bei der Bestückung von Hybridschaltkreisen und Leiterplatten, die dem Keramik-Vielschichtkonden-

sator ein außerordentlich breites Anwendungsgebiet erschlossen hat. Man darf annehmen, daß alle anderen Niedervoltkondensatoren diesem Trend folgen werden, wodurch sich die Proportionen später wieder verschieben könnten. Mit Sicherheit wird der Anteil technologisch integrierter Kondensatoren in der Zukunft zunehmen, was jedoch nicht im Widerspruch steht zu einer bis zum Jahr 1990 abzusehenden absoluten Stückzahlzunahme der diskreten Bauelemente, die sich immer neue Anwendungsgebiete erschließen werden.

Die Skizzen in Bild 3 sollen am Beispiel typischer Konstruktionsvarianten einen anschaulichen Überblick über verschiedene Kondensatorbauformen geben, woraus ohne weitere Erläuterung typische historische Stufen der Miniaturisierung, der Leiterplattenkompatibilität und der Integration erkennbar sind. Hinweise zu den Prinzipien der inneren Konstruktion geben die Skizzen im Bild 4. Die Leydener Flasche (Bild 3a) ist der Prototyp der Luft- bzw. Gaskondensatoren, die später meist als Platten- oder Rohrkondensatoren ausgeführt worden sind. Am bekanntesten dürfte der jetzt fast bedeutungslose Luftdrehkondensator (mit Ausnahme der Lufttrimmer) mit vielen dem Anwendungszweck angepaßten Plattenkonstruktionen sein. Wickel- und Keramikkondensatoren haben sich Anwendungsgebiete in allen Leistungsbereichen erschlossen. Der Hochspannungsbetrieb verlangt überschlagssichere Anschlußelemente, was man an Isolatorkonstruktionen mit langen Kriechstrecken erkennt (Bild 3b und c). Der Miniaturisierungstrend hat nicht zuletzt aus material-ökonomischen Gründen auch die Leistungskondensatoren erfaßt. Eine Neuentwicklung des VEB Kombinat Keramische Werke Hermsdorf für Hochfrequenzanwendungen im Nennspannungsbereich bis 7 kV zeichnet sich durch eine sehr raumsparende, kompakte Konstruktion aus (Bild 3d). Allerdings hat man zur Vermeidung von Randüberschlägen auch hier den randnahen Elektrodenkrümmungsradius mit Hilfe eines speziellen konzentrischen Wulstes des scheibenförmigen Dielektrikums künstlich vergrößert. Vor allem bei Leistungswickelkondensatoren verwendet man neben einfachen Rund- und Flachwickeln oft auch spezielle, kombinierende Wickelkonstruktionen, z. B. mit überlappenden Metall-

folieelektroden (Bild 4a), und spart damit u. a. Gehäusematerial. Die Hochspannungsfestigkeit der Leistungswickelkondensatoren wird außer mit dem unumgänglichen Isolierband (Bild 4a und b) durch geeignete flüssige Imprägniermedien gewährleistet, was an die Gehäusekonstruktion spezifische Anforderungen stellt. Niedrige Impedanzen im breiten Frequenzbereich werden erzielt, seitdem die Stirnflächenkontaktierung bei Wickelkondensatoren Eingang fand (Bild 3e und 4b), die zuvor bereits bei Rohrkondensatoren gebräuchlich war.

Der Miniaturisierungsschub infolge Substitution der Elektrodenfolien durch direkte Schichtmetallisierung (Bild 4a und c) der Dielektrikumsfolien ist noch nicht abgeschlossen, weil einige Foliedielektrika Beschichtungsprobleme bereiten bzw. bei bestimmten Leistungskondensatoren die Starkstrombelastbarkeit nicht gewährleistet wäre. Zur Minimierung von Toleranzen unter dem Aspekt der Stirnflächenkontaktierung und zur Beherrschung dünnster selbsttragender Dielektrikumsfolien steigen die Anforderungen an die Wickeltechnik. Dies trifft jedoch auch in zunehmendem Maß für Trägerfolienverfahren zu, die z. B. bei Realisierung von Wickelkondensatoren in Dünnschichttechnik (organisches Schichtdielektrikum, z. B. Glimmpolymer; Dünnschichtelektroden, z. B. aufgedampft) künftig verstärkt Eingang in die Kondensatorpraxis finden werden (Bild 4c).

Die Stapeltechnik in Verbindung mit Stirnflächenmetallisierung hat sich beispielsweise bei Glimmer- und Keramikkondensatoren durchgesetzt (Bild 4d). Der keramische Vielschicht-Chipkondensator, der erst am Anfang einer progressiven Entwicklung steht, kann normale wie dielektrische Folien mit Oberflächen- bzw. Korngrenzensperrschichten enthalten (Bild 4e). Sofern geeignete niedrigsinternde Dielektrika gefunden werden, ist eine bedeutende Edelmetallsubstitution möglich, da gegenwärtig noch Edelmetallelektroden gebräuchlich sind, die in oxydierender Atmosphäre den hohen Sintertemperaturen Stand halten müssen. Foliewickel von Elektrolytkondensatoren enthalten gewöhnlich neben zwei porösen Oxidalektrodenfolien zwei poröse Abstandhalterfolien aus speziellem Kondensatorpapier, das etwa 50 %

des Wickelvolumens einnimmt (Bild 4f). Neben großen Bauformen, die man direkt am Chassis befestigt (Bild 3f), dominierte in der Vergangenheit die leiterplattengerechte Konstruktion (Bild 3g). Fortschritte der Ätztechnologie hatten bei den traditionellen Ventilm Metallfolien aus Tantal und Aluminium in den letzten Jahren Oberflächenvergrößerungen (bezogen auf Glattfolie) um das 90 bis 150fache zur Folge. Infolge außergewöhnlichem Preisanstieg bei Tantalrohstoffen (Faktor 10 seit dem Jahr 1975) wurden die Hersteller von Tantalpulver, das als Ausgangsmaterial für poröse Sinterelektroden von Elektrolytkondensatoren mit flüssigem und festem Elektrolyt dient (Bild 4g), zu ebenso ungewöhnlichen Erhöhungen der spezifischen Pulveroberfläche herausgefordert. Wie jedoch Bild 5 zeigt, treten noch erhebliche Oberflächenverluste bei technologischer Realisierung der Kondensatoren auf. Die Differenz zwischen den spezifischen Oberflächen der frisch geätzten Niedervoltfolie bzw. der Pulveroberfläche und den erfahrungsgemäß nutzbaren spezifischen Oberflächen in Kondensatoren mit flüssigem bzw. Festelektrolyt stellt noch eine erhebliche Entwicklungsreserve insbesondere unter dem Miniaturisierungsaspekt dar. Festelektrolytkondensatoren wurden von Anfang an leiterplattengerecht konstruiert. Neben zylindrischen und prismatischen Bauformen hat sich der sogenannte Tropfenkondensator ein breites Anwendungsgebiet erschlossen (Bild 3h und i). Gegenwärtig verlagert sich das Interesse der Konstrukteure verstärkt auf die Chip-Bauformen, die in nackten bzw. umhüllten Varianten bekannt geworden sind (Bild 3j) und sich im Äußeren teilweise nicht von der Chip-Bauform des keramischen Vielschichtkondensators unterscheiden (Bild 3k).

Den Renner unter den höchstkapazitiven Bauelementen dürften möglicherweise in naher Zukunft die elektrochemischen Kondensatoren bzw. die Ionisatoren ausmachen, die als Dielektrikum die sehr dünne Doppelschicht zwischen einem flüssigen (Bild 4h) bzw. festen Elektrolyt und kolloidalen Elektrodenpartikeln (z. B. Kohlenstoffteilchen) nutzen.

Kondensatoren in Dünn- und Dickschichtschaltungen (Bild 3l und 4i) sowie in Festkörperschaltkreisen der SOS-Technik und der

monolithischen Halbleitertechnik (Bild 3m und 4j) repräsentieren die vorerst höchste Integrationsform dieser Bauelemente, Mischtechniken, wie im Bild 3n am Beispiel eines aktiven Dünnschicht-RC-Filters und eines Operationsverstärkers in Halbleiterblocktechnik auf einem gemeinsamen Siliziumsubstrat gezeigt, werden sich in zunehmendem Maß durchsetzen. Diese Entwicklungsrichtung wird in Zukunft für Kondensatoren niedriger und niedrigster Leistung eine bestimmende Komponente sein und sich der unmittelbaren Konkurrenz zu diskreten Kondensator-konstruktionen stellen. Es ist absehbar, daß mit dem Ziel, integrierte hochkapazitive Bauelemente auf dem Schaltkreissubstrat zu realisieren, die Stapelvariante der Dünnschichtkonstruktion in Analogie zu den Vielschichtbauformen heutiger Keramik-, Glimmer- und Dickschichtkondensatoren Eingang in die Praxis finden wird.

Die Übernahme der auf dem Gebiet der engeren Hybridtechnik mit Chip-Einbaukomponenten gewonnenen Erfahrungen in den Bereich der Leiterplattentechnik dürfte einer der markantesten Schritte der letzten Jahre sein, der das Grenzgebiet zwischen der diskreten und der integrierten Technik betrifft. Zur Veranschaulichung sind in Bild 6 den typischen RC-Strukturen von Hybrid-schaltkreisen (a reine Schichtschaltung, b Schichtwiderstandsnetzwerk mit Chipkondensator-Einbaukomponenten) entsprechende Leiterplatten-Mischtechniken am Beispiel von RC-Konstruktionen gegenübergestellt (c rückseitiger Schichtwiderstand, diskrete Kondensatoren mit axialen bzw. radialen Anschlußdrähten, Chipkondensator; d rückseitiger Schichtwiderstand, Chipkondensatoren). Damit einher geht ein spürbarer Rückgang von Bauelementen mit axialen Anschlußdrähten zugunsten der radialen und später der drahtlosen Chip-Konstruktion.

Für den Entwurf, die Konstruktion und die Anwendung von Kondensatoren benötigt man Vergleichsangaben zu den Parameterbereichen der Konstruktionswerkstoffe und der Bauelemente selbst. Dazu sollen einige Daten zusammengestellt werden, ohne dabei den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Den technischen Stand der mit Festkondensatoren bis zum Jahr

1965 erzielten Nennkapazitäten (C_N), Kapazitätstoleranzen ($\Delta C/C$), Nennspannungen (U_N), Spitzenspannungen (U_S), Spannungsderatings ($U_{125^\circ C}/U_{85^\circ C}$), Isolationswiderstände (R_{IS}), Temperaturkoeffizienten der Kapazität (α_C) und des Isolationswiderstandes (α_R), spezifischen Ladungen (q) und Betriebstemperaturen (T_B) zeigt Bild 7.

Einen interessanten historischen Vergleich liefert auch Tabelle 1 für metallisierte Kondensatoren, woraus vor allem die damaligen Fortschritte durch den massiven Übergang von Papierfolien zu Lackschichten bzw. Kunststofffolien hervorgehen.

Angaben zu spezifischer Dichte (μ), dielektrischem Verlustfaktor ($\tan \delta$), relativer Dielektrizitätskonstante (ϵ), Dielektrikumsdicke (d), spezifischem elektrischen Widerstand (ρ) und Hygroskopizität (φ) für dielektrische Werkstoffe von Leistungskondensatoren finden sich in Tabelle 2.

Das Imprägniermittel Trichlordiphenyl entspricht aufgrund seiner Toxizität nicht mehr den verschärften Umweltschutzbestimmungen. Es gibt weltweite Bemühungen zu seiner Substitution.

Einige Eigenschaften potentieller Substituenten sind in Tabelle 3 zusammengestellt worden.

Die markantesten Veränderungen im Bereich der Leistungskondensatoren mit Papier- und/oder Kunststofffoliedielektrikum aufgrund des beständigen Strebens nach Miniaturisierung und Kostensenkung lauten

- Umstellung vom herkömmlichen dreilagigen Dielektrikum auf das zweilagige,
- Anwendung biaxial gereckter Polypropylenfolien besonders in Kondensatoren mit Mischdielektrikum,
- verstärkte Anwendung von metallisiertem Papier hoher Dichte und metallisierter Polypropylenfolie.

Das Interesse der Hersteller von Wickelkondensatoren (insbesondere für mittlere und niedrige Betriebsspannungen erstreckt sich auf immer neue Foliewerkstoffe, um folgenden Trends der Werkstoff- bzw. Betriebsparameter gerecht zu werden:

- größere ρ , ϵ , μ , $R_{IS} \cdot C_N$, Folie-Bruchfestigkeiten,
- höhere dielektrische (E_D) und Betriebs-Durchschlagsfeldstärken (E_B),

- erweiterte T_B -Bereiche,
- verringerte Kapazitätsdrift ($\Delta C/\Delta t$), Hygroskopizität,
- kleinere dielektrische ($\tan \delta_{\epsilon}$) und Betriebsverlustfaktoren ($\tan \delta_B$),
- Minimierung von d.

Entsprechende Zahlenangaben bzw. qualitative Bewertungen für Kunststofffolien, Lack- und Glimmpolymerisatschichten, die der neueren Literatur entnommen worden sind, finden sich in Tabelle 4a und b. Weitere Kriterien entsprechender Wickelkondensatoren sind beispielsweise die Strombelastbarkeit (bei Polykarbonat und Polysulfon bisher nicht ausreichend), Metallisierbarkeit (bei Polypropylen und Polytetrafluoräthylen problematisch), Temperaturbeständigkeit (bei Polystyrol ungenügend), Lösungsmittelbeständigkeit (Polystyrol, Polykarbonat ungenügend). Unter Berücksichtigung der relativen Kosten zeichnen sich für die gegenwärtig und in nächster Zukunft wichtigsten Dielektrika die in Tabelle 5 aufgeführten spezifischen Anwendungsbereiche und Entwicklungsschwerpunkte ab.

Wie ein Blick auf Bild 8 zeigt, in dem die Temperaturabhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors der wichtigsten Kunststoffolie-Dielektrika und von Kondensatorpapier, das mit Mineralöl bzw. Trichlordiphenyl imprägniert worden ist, grafisch aufgetragen wurde, kommt der massenhaften Anwendung des Polypropylens größte Bedeutung zu. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch vergleichsweise sehr niedrige $\tan \delta_{\epsilon}$ aus. Bekanntlich entsteht die stärkste Erwärmung eines Kondensators unter Wechselspannungsbelastung durch die Verlustleistung im Dielektrikum.

Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyt verlangen eine auslaufsichere Gehäusekonstruktion. Die zuverlässige Abdichtung der grundsätzlich aus Metall (z. B. Ag, Al, Nb, Ta) bzw. Kunststoff gefertigten Gehäuse ist noch immer ein Problem. Die Gummiabdichtung in Verbindung mit Sicken und Bördeln des Häuserandes hat sich noch am besten bewährt, was allerdings nur mit dem Metallgehäuse üblich ist. Eine markante Erscheinung ist gegenwärtig die durch ökonomische Aspekte

(hoher Ta-Preis!) ausgelöste Konkurrenz miniaturisierter Al-Elektrolytkondensatoren mit den massenhaft produzierten Ta-Tropfenkondensatoren, deren Festelektrolytkonzept die Anwendung der technologisch attraktiven Tauchumhüllung erlaubte. Die Übersicht in Tabelle 6 zeigt, daß zumindest aus der Sicht der aufgeführten Bauelementeparameter eine Teilsubstitution von Ta-Tropfenkondensatoren durch billigere Al-Kondensatoren möglich ist. Al-Festelektrolytkondensatoren in der Tropfenbauform sind im begrenzten Umfang ebenfalls als Substituenten der Tantal-Bauelemente aufzufassen. Dessenungeachtet muß man feststellen, daß Ta-Festelektrolytkondensatoren aufgrund ihres einzigartigen Eigenschaftskomplexes, der u. a. gekennzeichnet ist durch

- breite Parameterbereiche,
- hohe Temperaturstabilität der Parameter,
- hohe Langzeitstabilität der Parameter,
- geringe Ausfallrate,
- unbegrenzte Lagerfähigkeit,

niemals vollständig ersetzt werden können. Außerdem bestehen noch erhebliche Reserven bei Tantal hinsichtlich des Materialausnutzungsgrades (s. Bild 5). In Tabelle 7 ist eine relative Einstufung von Al-, Nb- und Ta-Elektrolytkondensatoren mit geätzter Foliewickel- bzw. poröser Sinterkörper-Oxid-elektrode vorgenommen worden. Anhand der hier speziell ausgewählten Charakteristiken schneidet der Ta-Festelektrolytkondensator am besten ab. Bei der Bewertung wurde u. a. berücksichtigt, daß die Schnittkante bei Wickelkondensatoren prinzipiell eine Stabilitätsverschlechterung gegenüber Sinterkörperbauelementen bedeutet, daß das anodische Nb_2O_5 noch nicht weitgehend defektfrei hergestellt werden kann und daß die Spannungsfestigkeit von Al-Festelektrolytkondensatoren während der thermischen MnO_2 -Abscheidung stärker herabgesetzt wird als bei Ta-Festelektrolytkondensatoren. Quantitative physikalisch-chemische und werkstoff-technologische Kenngrößen von Al- und Ta-Elektrolytkondensatoren, die für Entwurf und Konstruktion fundamentale Bedeutung haben, sind in Tabelle 8 zusammengestellt worden.

Die Vielschicht-Stapelkonstruktion bei Keramikkondensatoren hat sich bereits in allen traditionellen Bauformen durchgesetzt. Eine Übersicht zu Grenzparametern dieser Bauelemente einschließlich der hybridgerechten Chipbauform gibt Tabelle 9. Bild 9 vergleicht miteinander die Nennkapazitätsbereiche von Porzellan-, Glas- und verschiedenen Keramik-Kondensatortypen. Auf dem Sektor von Keramikwerkstoffen mit sehr hohen ϵ in Verbindung mit der Temperaturkompensation bestehen noch erhebliche Entwicklungsreserven.

Wichtige spezielle Entwicklungsrichtungen sind u. a.

- Verringerung der Kapazitäts-Temperaturabhängigkeit bei NDK- (Typ I)- Keramik,
- Verringerung bzw. Linearisierung der Temperatur- und Spannungsabhängigkeit der Kapazität, Verringerung des Verlustfaktors bei HDK- (Typ II)- Keramik,
- Erhöhung des Isolationswiderstandes bei Sperrschichtkeramik (Typ III).

Trimmerkondensatoren haben sich mit verschiedenen Dielektrika insbesondere die in Tabelle 10 aufgeführten Anwendungsbereiche erschlossen:

Tabelle 10 : Anwendungsbereiche von Trimmerkondensatoren

Dielektrikum	bevorzugte Anwendung
Quarz, Glas	HF und VHF (bis 300 MHz), hohe Anforderungen
Luft	UHF, hohe Anforderungen
Saphir	UHF- und GHz-Bereich, hohe Anforderungen
Keramik, Kunststoff	allgem. Anforderungen, (niedriger Preis)
Glimmer	niedriger $\tan \delta$

Typische Kapazitätseinstellbereiche in "single turn"- (Drehwinkel: 0° bis 180°) und "multi-turn"-Betrieb (Drehwinkel: 0° bis n mal 180°) liegen zwischen 0,3 bis 1,2 pF und 1 bis 120 pF. Eine relative Bewertung der anhand des Dielektrikums unterschiedener Trimmerkondensatoren findet sich in Tabelle 11. Daraus geht hervor, daß dem Luftkondensator nach wie vor Bedeutung zukommt. Saphirkondensatoren haben die beste technische Spezifikation. Der hohe Preis steht dazu im Kontrast und setzt der Verbreitung im Bereich allgemeiner Anwendungsanforderungen gewisse Grenzen.

In Tabelle 12 sind noch einmal Kenngrößen der wichtigsten diskreten Kondensatorarten miteinander verglichen worden, wobei folgende Bezeichnungen für Kunststoffolievarianten gelten:

Bezeichnung	Dielektrikum	Elektroden-Belag
KC	Polykarbonatfolie	Al-Folie
MKC	Polykarbonatfolie	Al aufgedampft
KP	Polypropylenfolie	Al-Folie
MKP	Polypropylenfolie	Al aufgedampft
KS	Polystyrolfolie	Sn-Folie, Al-Folie
MKS	Polystyrolfolie	Lackschicht
KT	Polyesterfolie	Al-Folie
MKT	Polyesterfolie	Al aufgedampft

Man hat bei allen Vor- und Nachteilen, die die eine oder andere Art bzw. Untergruppe gegenüber einer anderen hat, davon auszugehen, daß die angegebenen Kenngrößen in ihrer Gesamtheit einem beständigen Weiterentwicklungsprozeß unterworfen sind. Daran sind werkstoffliche, konstruktive und technologische Komponenten nahezu gleichrangig beteiligt.

Literatur

- A. Bennet : Elektronik H. 19 (1979)
- J. Both : nachrichten elektronik 35 (1981) 153
- H.V. De Matos : electronic prod. magaz. 23 (1980) Nr. 3
- M. Garski : Mark & Technik Nr. 35 (1980) 33
- J.D. Goodman : electronic prod. magaz. 23 (1980) Nr. 3
- Ch.A. Harper : Handbook of Materials and Processes for
(Herausg.) Electronics, Mc Graw-Hill Book Comp.,
New York u. a. (1970)
- P. Petrick;
O. Nögel;
G. Helwig : Jahrbuch der Unterhaltungselektronik
(1978)
- H. Heywang;
H. Handek : Nachrichtentechnische Z. H. 8 (1973) 331
- P. Hille : Elektronik H. 13 (1981)
- D.G. Kamphausen : Metall 35 (1981) 586
- H.-D. Langer : Festkörperelektrolytkondensatoren,
Akademie-verlag, Berlin (1982)
- H.-D. Langer;
K. Schuricht : radio fernsehen elektronik 29 (1980) 447
- M.M. Lerner : Kondensatori na osnove oksidnoj isola-
zii, Winiti, Moskwa (1973)
- T. Martinmäki : Manuskript zum Vortr. auf der Tagung
NORD-IS 80, Roros, Norwegen (1980)
- N. N. : Elektronik H. 19 (1979)
- N. N. : Mark & Technik Nr. 35 (1980) 30
- N. N. : Electronics News 18 (1980) 4
- W.T. Renne : Plenocnie kondensatori s organiceskim
dielektrikom, Energia, Leningrad (1971)
- G. Vespermann : Mark & Technik Nr. 36 (1980) 38

Tabelle 1 : Entwicklung von Parametern metallisierter Kunststoffolie-Kondensatoren von 1948 bis 1973

Parameter	Stand	
	1948	1973
dünnsstes Dielektrikum	9, μm (Papier)	1,2, μm (Lack)
maximale Betriebsfeldstärke	31 $\text{V}/\mu\text{m}^{-1}$ (Papier)	105 $\text{V}/\mu\text{m}^{-1}$ (Polyäthylen-terephthalat)
maximale Blindleistungsdichte bei $U_N = 380 \text{ V}$	2,1 VAcm^{-3} (Papier)	9 VAcm^{-3} (Polypropylen)
höchste Kapazitätsdichte für Nieder-volt-Gleichspannung	0,55, μFcm^{-3} (Papier)	30, μFcm^{-3} (Lack)
niedrigster Verlustfaktor ($f = 50 \text{ Hz}$)	$3 \cdot 10^{-3}$ (Papier)	$0,3 \cdot 10^{-3}$ (Polypropylen)
niedrigste Nennspannung	160 V (Papier)	25 V (Lack)
höchste Nennspannung	500 V (Papier)	10 000 V (Polyäthylen-terephthalat)

Tabelle 2 : Kennwerte dielektrischer Werkstoffe von Leistungskondensatoren

Kennwert	Werkstoff		
	Kondensatorpapier	Kondensatoröl	Trichlordiphenyl
ρ_u (gcm ⁻³)	1 ... 1,35	0,86 ... 0,89	1,38
$\tan \delta$ (f=50 Hz)	$\leq 0,0017$	$\leq 0,0002$	0,0005... 0,001
ϵ	2,2 ... 3,45	2,1 ... 2,2	5,9
E_D (Vcm ⁻¹)	(1,8...5) · 10 ⁵		
d (µm)	5 ... 30	-	-
g (Ωcm)		$\leq 3 \cdot 10^{13}$	10 ¹¹ ...10 ¹²
φ (%)	1,7 ... 4,4		

Tabelle 3: Eigenschaften von dielektrischen Flüssigkeiten im Vergleich zu Trichlordiphenyl

Chemischer Name (englisch)	Abkürzung	ϵ (T=25°)	Flammpunkt (°)	Viskosität (mm ² s ⁻¹) bei T	ρ (gcm ⁻³) bei T=20°C
Diocetyl Phtalate	DOP	4,8...5,25	2 16	80 (20°C)	0,98
DOP + Tri-chloro Benzene	DOP+TCB	5,2...5,47	152	14 (30°C)	1,08
Butylated Monochloro Biphenyloide	BMBO	4,1...4,4	174	15 (20°C)	1,09
Isopropyl - biphenyl	IPB	2,5...2,83	155	5 (38°C)	0,99
Benzylneo-caprate	BNC	3,5...3,75	155	6 (20°C)	0,96
Phenylxylyl Ethane	PXE	2,3...2,5 (80°C)	148	6,5 (30°C)	0,99
Trichloro-biphenyl	PCB	5,5...5,9	165	65 (20°C)	1,38

Tabelle 4a: Quantitative und qualitative Bewertung der Betriebsparameter von Kondensatoren mit Kunststoffolien und -schichten als Dielektrikum

Substanz	T_B (°C)	$\Delta C/C$ (%)		$\tan \delta_B$ (%)			$R_{IS} C_N$ (M Ω uF) min	E_B (V/ μ m ⁻¹) Folie metallisiert	$\Delta C/\Delta t_1$ (/uFh ⁻¹) Langzeit	α_C (ppm/ °C)	
		-25°C	25°C	-55°C	25°C	$T_{B,max}$					
Polystyrol	-55 +85	+1,5	-2,5	0,3max	0,1max	0,3max	hoch	3-15	klein	-150	
Polyester	-60 +125	-5,0	+15,0	1,5max	0,6max	2,0max	klein	16-40	25-60	mittel- hoch	+500
Polykarbonat	-55 +125	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	0,4	0,15	0,6	hoch	10-30	25-60	mittel	± 50 - +150
Polytetra- fluoräthylen	-55 +200	+1,5	-5,0	0,3max	0,1max	0,5max	hoch	2-15		klein	
Polypropylen	-55 +100	+1,0	-0,8	0,1max	0,1max	0,1max	hoch	8-15	25-60	sehr- klein	-120 -150
Polysulfon	-55 +150	$\pm 0,5$	-1,5	0,4	0,15	0,4	hoch			mittel- klein	
Polyvinyl- fluorid	-55 +100	-65	+10	5,0	1,5	3,5	klein				
Glimmpoly- merisate: Cyclohexan	+100				0,4max		mittel			mittel- klein	
Polypara- xylylen	sehr T-be- st \ddot{u} nd.							groß		mittel- hoch	

Tabelle 4b: Quantitative und qualitative Bewertung der Werkstoffparameter von Kunststoffolien und -schichten sowie von Zellulose-Lack

Substanz	ρ (Ω cm)	ϵ	ρ (g/cm ³)	d_{min} (/ μ m)	E_D (V/ μ m ⁻¹)	ψ (%)	$\tan \delta_\epsilon$ (%)
Polystyrol	10 ¹⁵ -10 ¹⁷	2,3-2,7	1,05	8	200-700	0,03-0,05	0,01-0,05
Polyester	10 ¹⁶ -10 ¹⁷	2,3-3,3	-0,95	1,5	-400	-0,4	0,01-0,06
Polykarbo- nat	6,1·10 ¹⁵	2,8-3,0	1,21	2	180-410	0,15-0,4	0,01-0,05
Polytetra- fluoräthylen	10 ¹⁸	2,0-2,2	-2,2	6	160-400	0,01	0,01
Polypropylen	10 ¹⁵ -10 ¹⁷	2,2-2,7	0,9-1,24	4	350-650	0,05	0,05-0,5
Polysulfon	5·10 ¹⁶	2,8-3,0	-1,35	2	425	0,22	0,01
Polyvinyl- fluorid		11,3					
Polyimid	10 ¹⁶ -10 ¹⁷	3,5	1,43		-400	0,32	0,002-0,003
Glimmpoly- merisate: Cyclohexan		2,5		-0,5			
Polypara- xylylen	hoch	rel.klein		0,5	sehr span- nungs- fest		
Zellulose- Lack	10 ¹⁰ -10 ¹²	3,2-6,4	1,15-1,22		250-400	0,9-2,2	0,01-0,04

Tabelle 5: Bewertung von Kunststoffdielektrika

Substanz	relative Kosten	Anwendungs- klassifi- zierung	Entwicklungs- schwerpunkte
Polystyrol	mittel	allgem. Anwendung	$\tan \delta$ kleiner, Stabilität er- höhen
Polyester	klein	allgem. Anwendung	$\Delta C/C$ verbessern
Polykarbonat	mittel	allgem. Anwendung	$\tan \delta_B$ kleiner
Polytetra- fluor- äthylen	hoch	spez. Anwendung	$\tan \delta_B$ kleiner, T_B größer. Metallisierung
Polypro- pylen	mittel bis hoch	allgem. Anwendung	$\tan \delta_B$ kleiner, Metallisierung
Poly- sulfon	mittel	spez. Anwendung	$\tan \delta_B$ kleiner, T_B größer
Polyvi- nylfluor- rid	hoch	spez. Anwendung	Stabilität er- höhen, $\tan \delta_B$ kleiner
Glimmpolyme- risate	mittel	spez. Anwendung	gesamte Techno- logie

Tabelle 6: Vergleich von Tantal- und Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Charakteristik	Serie Ta		Al		Al		Al	
	SQ-Serie	K-Serie	Z-Serie	LS-Serie	3H-Serie	MS-R-Serie		
Betriebstemperaturbereich (°C)	-55- 85	-40- 85	-40- 85	-40- 85	-40- 125	-40- 85		
Kapazitätsbereich (µF)	0,1-220	0,1-100	0,1-2200	0,47-10000	1-1000	0,1-100		
Nennspannungsbereich (V)	3,15-50	6,3-63	6,3-50	6,3-100	10-63	10-50		
Kapazitätstoleranz (%)	±20	±20	±20	-10 - +50	±20	±20		
max. Reststrom (µA) C _N in µF, U _N in V	0,008C _N U _N oder 0,05 (nach 2min)	0,01C _N U _N oder 3 (nach 5min)	0,002C _N U _N +1 (nach 2min)	0,02C _N U _N +3 (nach 5min)	0,002C _N U _N +2 (nach 5min)	0,002C _N U _N +0,3 (nach 1min)		
max. Verlustfaktor bei f= 120Hz	0,04-0,1	0,05-0,24	0,08-0,20	0,08-0,25	0,10-0,17	0,06-0,17		
Lebensdauerprüfung bei Belastung mit U _N	2000 h bei 85°C	1000 h bei 85°C	2000 h bei 85°C	1000 h bei 85°C	1000 h bei 125°C	1000 h bei 85°C		
Abmessungen (mm): Typ								
1, µF/35V	4x7(2,5) ¹⁾	4x7(1,5)	5,5x12(2,0)	-	-	-		
1, µF/50V	5x8(3,0)	4x7(1,5)	5,5x12(2,0)	-	-	5x15(3,5)		
10, µF/25V	6x10(3,5)	5x7(2,0)	6,8x12(2,5)	-	-	-		
33, µF/16V	6,5x11(3,5)	6,3x7(2,5)	6,8x12(2,5)	5x11(2,0)	8x12(3,5) ²⁾	6,3x15(4,0)		
100, µF/6,3V	8x11,5(5,0)	6,3x7(2,5)	8,5x12(3,5)	6,3x11(2,5)	10x12(2,5) ³⁾			

- 1) Gehäuseabmessungen DurchmesserxLänge (Rastermaß der Anschlußdrähte); 2) Typ 47,µF/16V
 3) Typ 100,µF/10V

Tabelle 7: Relative Einstufung von Elektrolytkondensatoren (1=sehr gut, 2=gut, 3=mäßig)

Charakteristik	Elektrolyt	oxydierte Folie						oxydierte Sinterkörper					
		Al/Al ₂ O ₃		Nb/Nb ₂ O ₅		Ta/Ta ₂ O ₅		Al/Al ₂ O ₃		Nb/Nb ₂ O ₅		Ta/Ta ₂ O ₅	
		f1 ¹⁾	f ¹⁾	f1	f	f1	f	f1	f	f1	f	f1	f
hohe spezifische Kapazität		1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1
hohe Nennspannung		1	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1-2
niedriger Reststrom		2	3	3	3	1	2	2	2	2	2	1	1
hohe Wechselstrombelastbarkeit		1	2	2	2	2	2	2	3	2	3	1-2	2
hohe Impulsbelastbarkeit		1	3	2	3	2	3	2	3	3	3	2	2
hohe Umkehrspannung		3	3	3	2	3	2	3	2	3	2	3	1
niedriger Verlustfaktor		3	1	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1
breiter Temperaturbereich		2	2-3	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1
HF-Eignung		2-3	2	2-3	2	2-3	2	2	1	2	1	2	1
hohe Lebensdauer		2-3	2-3	2-3	2-3	2	2	2-3	2-3	2-3	3	2	1
große Lagerzeit		3	2-3	3	2-3	2-3	2	3	2	3	2	2	1
Realisierbarkeit in hybrid- und leiterplattengerechter Chipbauform		3	2-3	3	2-3	3	2-3	3	1-2	3	2	3	1
Preis		1	1-2	2	2	3	3	2	2	2	2	3	2-3

Tabelle 8 : Physikalisch-chemische und werkstofftechnologische Kenngrößen von Al- und Ta-Elektrolytkondensatoren

Kenngröße	Dimension	Wertebereich
ϵ :		
Al ₂ O ₃		8 ... 11
Ta ₂ O ₅		22 ... 29
Wachstumsrate β_F des Oxides bei anodischer Oxydation ($N = 250C$)	nmV ⁻¹	
Al ₂ O ₃		1,2 ... 1,4
Ta ₂ O ₅		1,6 ... 1,7
Verhältnis von Nennspannung zu Formierspannung		
Al, fl.		0,6 ... 0,8
Ta, fl.		0,2 ... 0,7
Formierspannung U_F (max. U_F entspricht der Funkenspannung)	V	
Al ₂ O ₃		20 ... 1100
Ta ₂ O ₅		20 ... 700
offene Porosität p von Ta-Sinterkörpern	%	35 ... 70
spezifische Nennladung q_N von Ta-Pulvern	μCg^{-1}	2000...20 000
Foliedicke d bei Al-Kond.(fl.) Anodenfolie	μm	80 ... 100
Katodenfolie		30 ... 50
Papierabstandhalter		20 ... 50
spezifische Oberfläche s Ta-Sinterkörper	m ² cm ⁻³	0,2 ... 1
Al-Glattfoliewickel einschl. Wickeldorn und Abstandhalter		(0,4 ... 40) · 10 ⁻⁴
Aufrauhfaktor β_A (Al, geätzt)		5 ... 150
Wickelvolumen V_W bei Al, fl. einschl. Wickeldorn und Abstandhalter	cm ³	0,01 ... 600
Sinterkörpervolumen V_S bei Ta, f. einschl. Anodendraht	cm ³	0,001 ... 2
Durchmesser-Höhe-Verhältnis γ einschl. Wickeldorn und Abstandhalter bzw. Anodendraht		
Al, fl.		0,2 ... 1
Ta, f.		0,3 ... 4
spezifischer elektrischer Widerstand ρ des Betriebs-elektrolyten ($N = 250C$):	cm	
Elektrolyte (fl.) auf Glykol- bzw. Dimethylformamid-Basis bei Al		10 ... 300
β - MnO ₂ (f.) bei Ta		0,1 ... 10

Tabelle 9 : Grenzparameter von Keramik-Vielschichtkondensatoren (Stand 1980)

Parameter	minimal	maximal
Nennkapazität	0,25 pF	56, uF
Nennspannung	6 V	4 kV
Verlustfaktor (1kHz...1MHz)	$1 \cdot 10^{-3}\%$	2,5 %
Isolationswiderstand (Prüfspannung $U_p = U_N$):		
Typ I	10^{10}	$2 \cdot 10^{11}$
Typ II	$2,5 \cdot 10^8$	10^{10}
$\frac{U_p}{U_N}$	1,15	3,2
Betriebstemperatur	- 60°C	200°C
Kapazitätstoleranz	$\pm 0,5 \%$	-20 /+ 80 %
Betriebsfrequenz:		
Typ I	50 Hz	10^{10} Hz
Typ II	50 Hz	10^9 Hz
Kapazität pro Volumen		12 nFmm^{-3}
Kapazität pro Fläche		20 nFmm^{-2}
Abmessungen (Grundfläche)	$1,25 \cdot 1 \text{ mm}^2$	$12,7 \cdot 14,2 \text{ mm}^2$
Anzahl der dielektrischen Schichten	5	≤ 50
Löttemperatur	210°C	260°C
Lötzeit	3 s	60 s
Ausfallrate	10^{-9} h^{-1}	10^{-5} h^{-1}

Tabelle 11: Relative Einstufung von Trimmerkondensatoren
(1 = Sehr gut, 2 = gut, 3 = mäßig bzw. nicht geeignet)

Charakteristik	n x 180°					180°			
	Glas+ Quarz	Saphir	Kunststoff	Keramik	Luft	Keramik	Kunststoff	Luft	Glimmer- Druck- Trimmer
hohe Stabilität	1	1-2	2	3	1	3	2	1	3
hoher Gütefaktor	1	1	1	2	1	3	1-2	1	1
Einstellempfindlichkeit	1	1	2	2	1	3	3	3	3
hohe Betriebs- spannung	1	1-2	1-2	1	3	3	3	3	2
HF-u.UHF-Eignung	3	1	3	2-3	1-2	1-3	2	1	3
RF - Eignung	2	2	3	3	1	3	2	1	1
kleine Abmessungen	3	1	3	2-3	3	1	1-2	3	3
breiter Betriebs- temperaturbereich	1	1	2	2	1	1-2	2	1	2
hohe Schockbe- lastungs-u.Schwin- gungsbeständigkeit	1	1	2	2	1	2	2	1-2	3
geringe Feuchte- empfindlichkeit	1	1-2	1	3	1	3	1	1	2
Preis	3	3	2	1	3	1	1	2	1

Tabelle 12: Qualitative und quantitative Bewertung (Spitzenwerte) der wichtigsten dis-
kreten Kondensatoren-Arten (q_N spezifische Nennladung)

Kondensator- Kenngröße	Elektrolyt			Polyester/Polykarbonat		Polypropylen		Keramik Scheibe/ Vielschicht		
	Al fl.	Ta fl.	f.	KT	MKT	KC	MKC	KP	MKP	
C_N (μF)	10^8	3600	1000	0,47	10	1	10	1	3,3	56
U_N (V)	500	900	100	1000	400	400	400	2000	1000	10 000
$\tan \delta_B$ (%) bei $f=1kHz$	20 (50Hz)	10^{-3} (50Hz)	6-10	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-3}$	$(3-5) \cdot 10^{-3}$	$(3-5) \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	2
T_B (°C)	-40- +85	-55- +200	-80- +125	-40- +125	-60- +100	-55- +125	-55- +100	-40- +100	-55- +85	-60- +200
Derating (U_B in % von U_N bei T_B)	50 (50°C)	30 (85°C)	30	20	20 (100°C)	50	20 (100°C)	-	-	-
Zeitkonstante (s)	10 ³ - 10 ⁵ 10 - 10 ⁴									
Reststrom (μA)	0,005- 0,05/ μFV		0,0005- 0,02/ μFV							
R_{IS} (M Ω)	5 $\cdot 10^2$ - 10 ⁸ 10 ² - 10 ⁸									
E_B (10 ⁴ Vcm ⁻¹)	(3-5,5 $\cdot 10^2$)			4 $\cdot 10^2$		3 - 60		0,2 - 3		
q_N^{-1} (10 ⁻⁴ cm ³ / μC^{-1})	10 ⁻³ - 10 ⁻¹			10 ⁻² - 10		10 ⁻² - 10 ²				
$C_N U_N$	sehr groß	sehr groß	groß	klein	mit- tel	klein	mit- tel	klein- mittel	mittel- groß	klein- mittel
Temperaturverhalten	mäßig	mäßig	gut	sehr gut		gut		gut		gut-mäßig
Stabilität	mittel		sehr gut	mittel		mittel		mittel		mittel
Lebensdauer	gut		gut	sehr gut		sehr gut		sehr gut		sehr gut
Lagerfähigkeit	mäßig		gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut	gut	mäßig-gut
leiterplattengerecht	ja									
hybridgerecht	nein	nein	ja	nein		nein		ja		ja
Preis pro $C_N U_N$	niedrig	mittel- hoch	niedrig	mit- tel	niedrig	mit- tel	mit- tel	mit- tel	mit- tel	niedrig

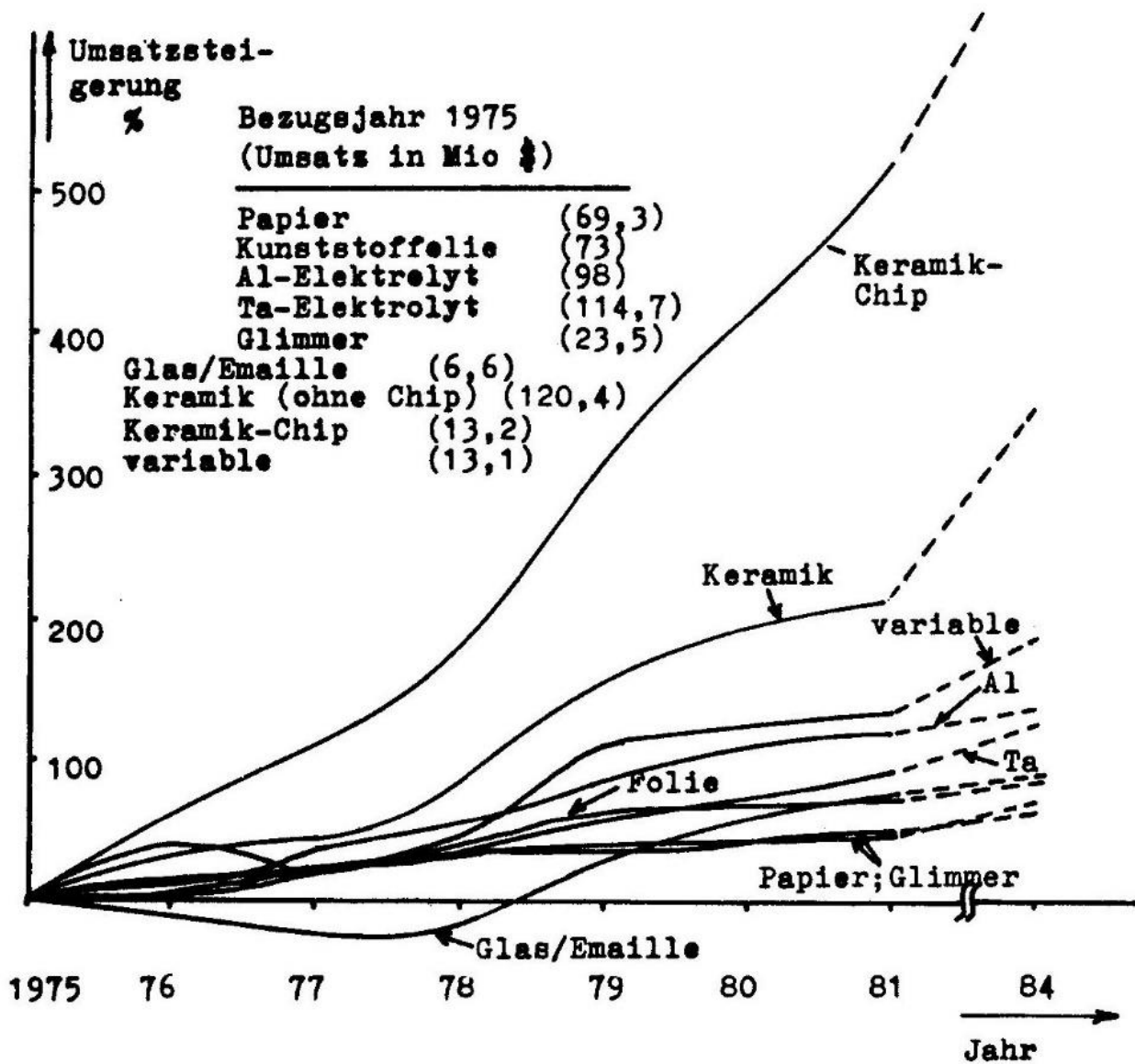


Bild 1a : Umsatzwachstum bei diskreten Kondensatoren in den USA

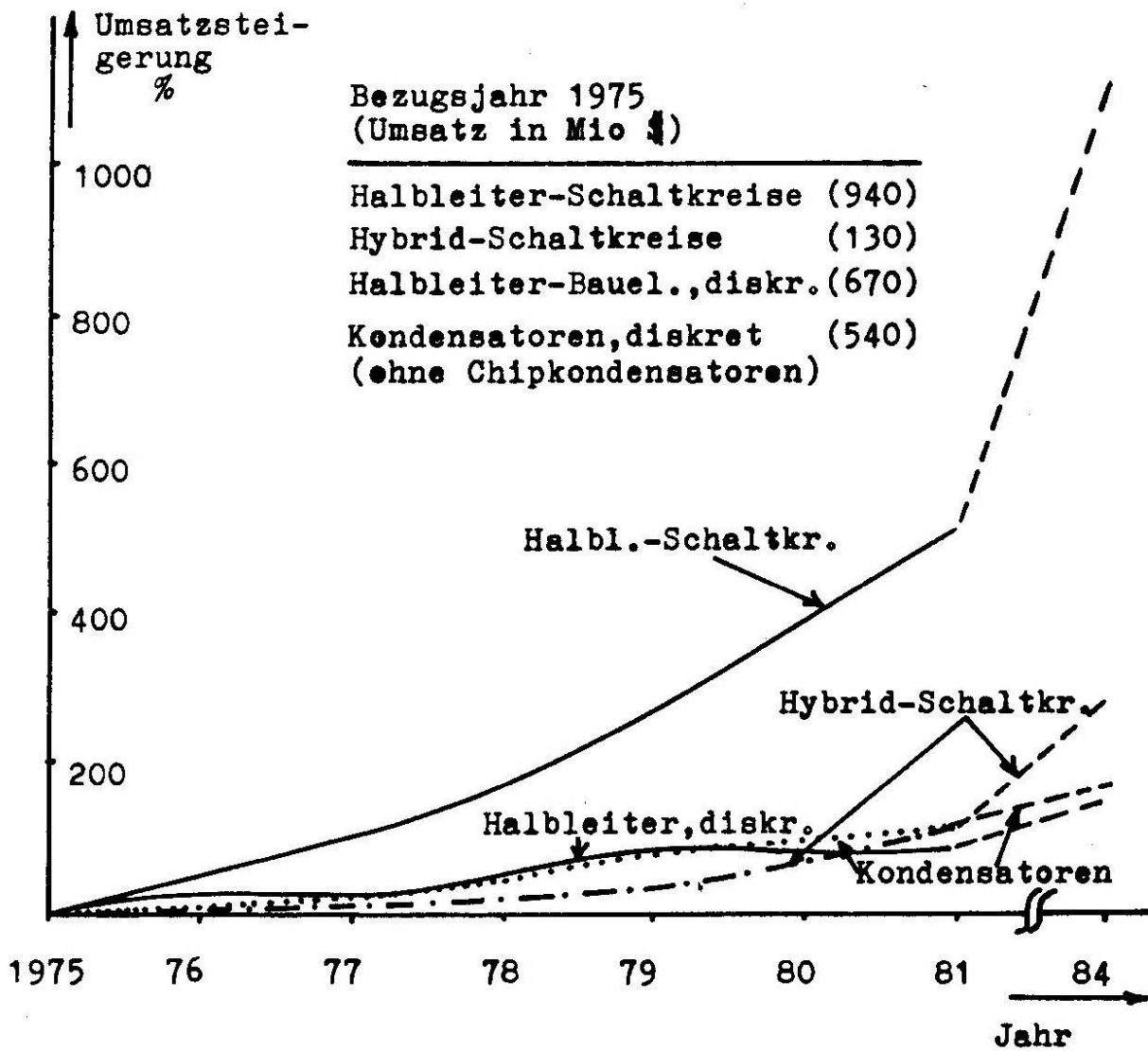
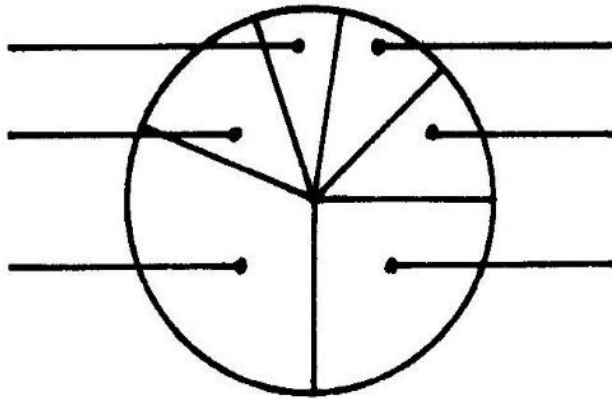


Bild 1b: Umsatzwachstum elektronischer Bauelemente und Schaltkreise in den USA

Westeuropa

Keramik-
Vielschicht
(7,2%)
andere
(13,0%)

Kunststoff-
Folie
(31,8%)



Gesamt:
1008 Mio S

Keramik-Scheibe
(10,4%)

Tantal
(11,9%)

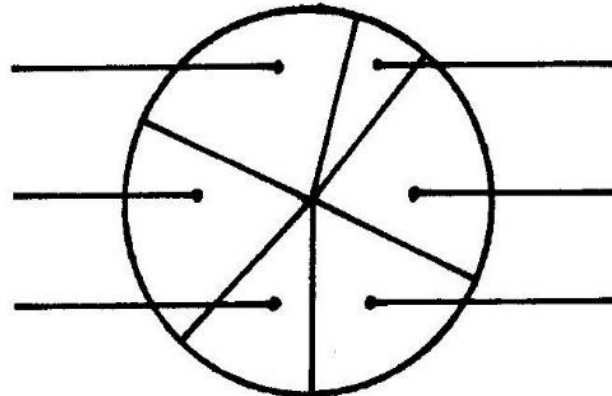
Aluminium
(25,7%)

USA

Keramik-
Vielschicht
(22,0%)

andere
(19,3%)

Kunststoff-
Folie
(12,4%)



Gesamt:
830 Mio S

Aluminium
(18,3%)

Tantal
(20,7%)

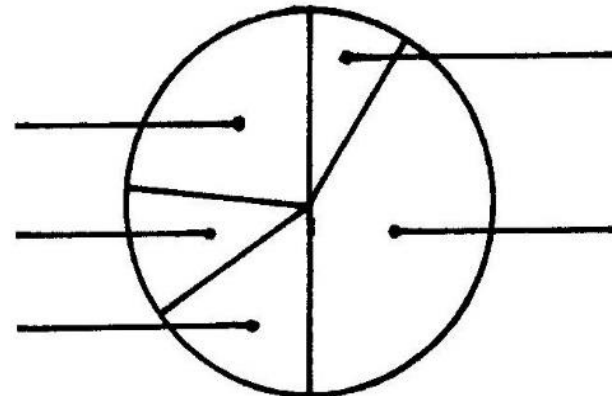
Keramik-Scheibe
(7,3%)

Japan

Keramik
(22,8%)

andere
(11,5%)

Kunststoff-
Folie
(15,7%)

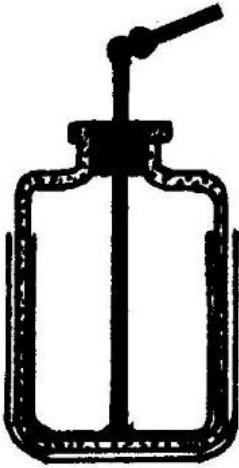


Gesamt:
766 Mio S

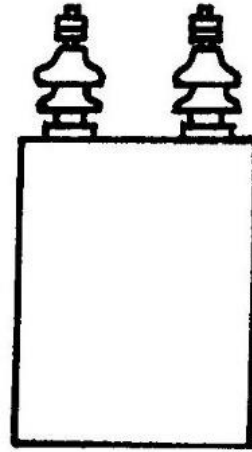
Tantal
(9,2%)

Aluminium
(40,8%)

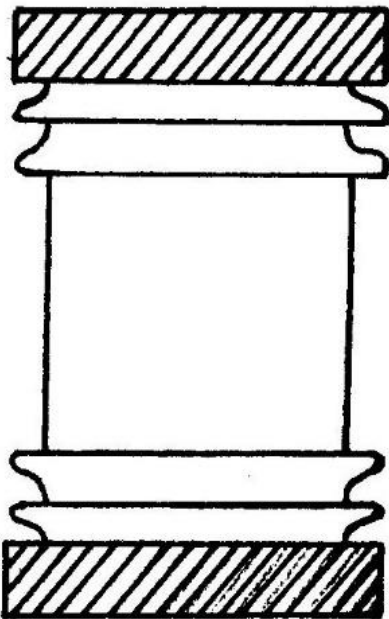
Bild 2 : Marktsituation bei Festkondensatoren in Westeuropa, USA und Japan (1978)



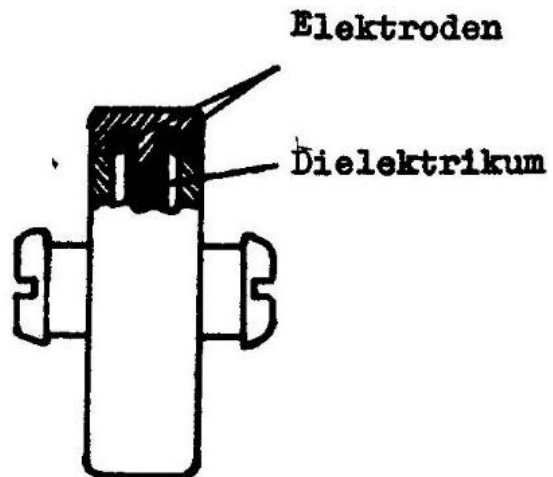
a) Leydener Flasche



b) Hochspannungs-Leistungskondensator

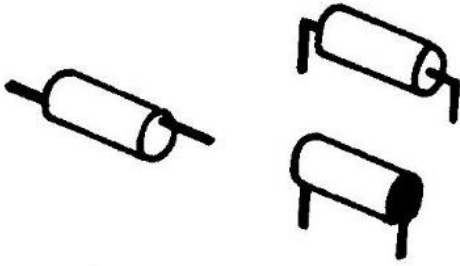


c) Höchstspannungs-Keramik-kondensator

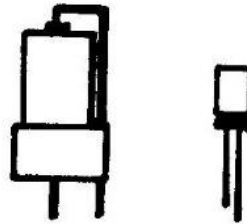


d) Hochfrequenz-Keramikleistungs-kondensator

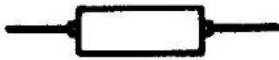
e) Wickelkondensatoren
(Einlege- und Stirnflächenkontakt)



f) Höchstkapazitiver
Elektrolytkonden-
sator (Schraubge-
winde zur Befesti-
gung an Chassis)



g) Elektrolytkondensatoren
(radial)



h) Elektrolytkonden-
sator (axial, mit
flüssigem und fe-
stem Elektrolyt)



prismatisches
Gehäuse



Tropfenkonden-
sator

i) Festelektrolyt-
kondensatoren



Nackt-Chip

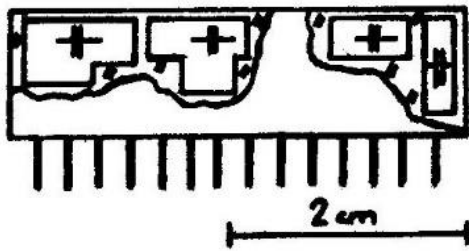


umhüllte Bau-
form

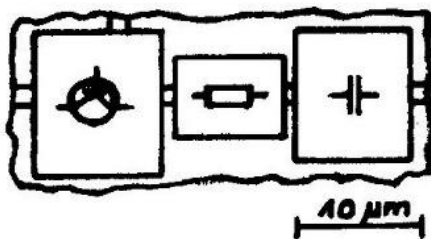


k) Keramik-Vielschicht-
kondensator (Chipbau-
form)

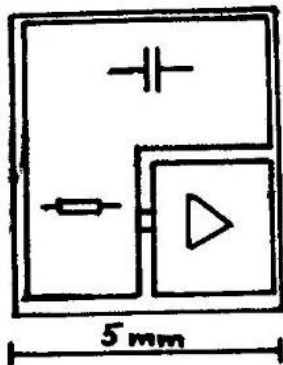
j) Festelektrolyt-Chipkon-
densatoren



1) Dünnschicht-RC-Schaltkreis
(Glassubstrat)

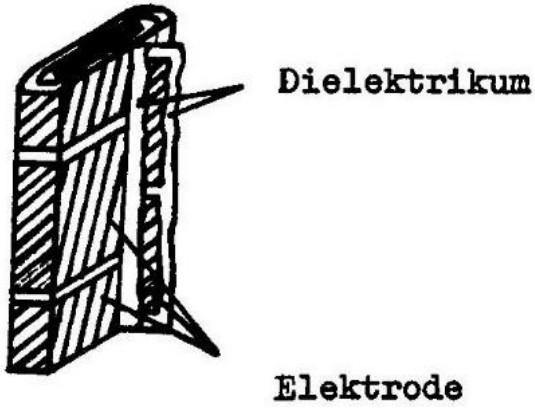


m) integrierter Schaltkreis mit RC-Komponenten und aktiven Bauelementen
(Halbleiter-Blocktechnik auf Si-Substrat)

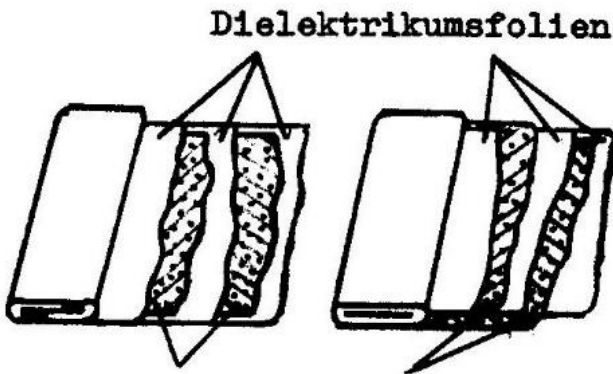


n) Dünnschicht-RC-Netzwerk und integrierter Halbleiter-Schaltkreis
(Mischtechnik auf Si-Substrat)

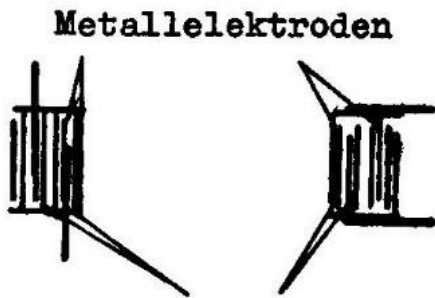
Bild 3 : Kondensatorbauformen in diskreter und integrierter Technik



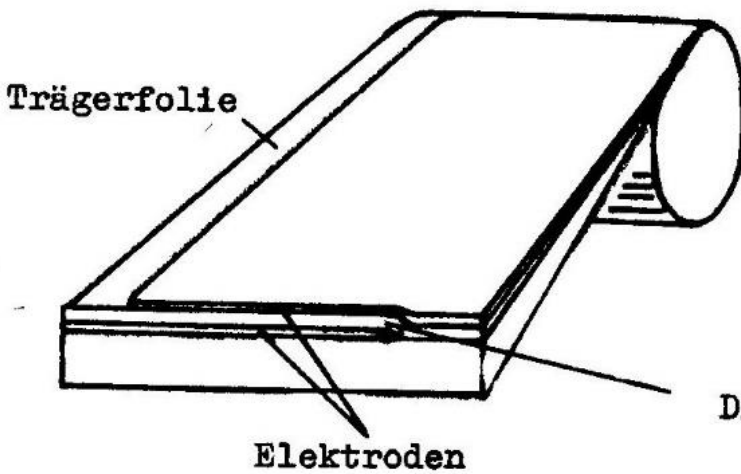
- a) Kondensatorwickel mit überlappenden Elektroden (Metallfolien bzw. -schichten)



- b) Kondensatorwickel mit Isolier- rand bzw. überstehender Elektrodenfolien (Einlege- bzw. Stirnflächenkontakt)

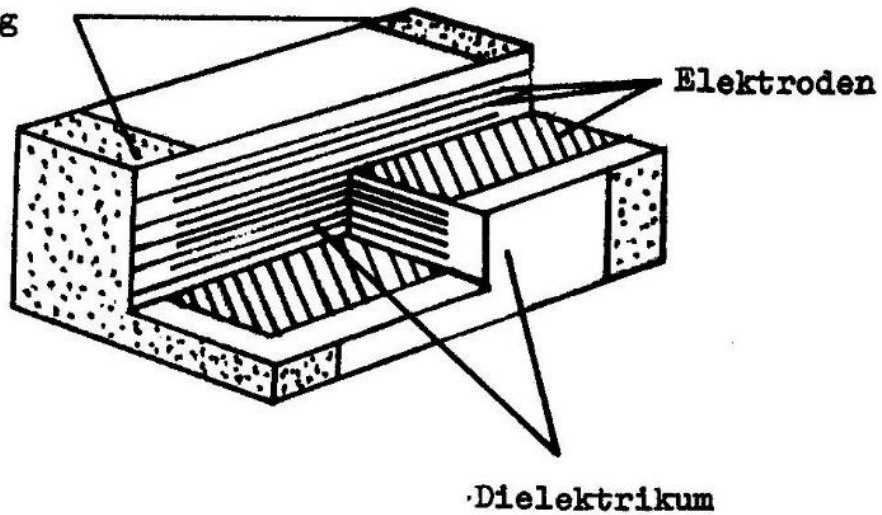


Dielektrikumsfolien

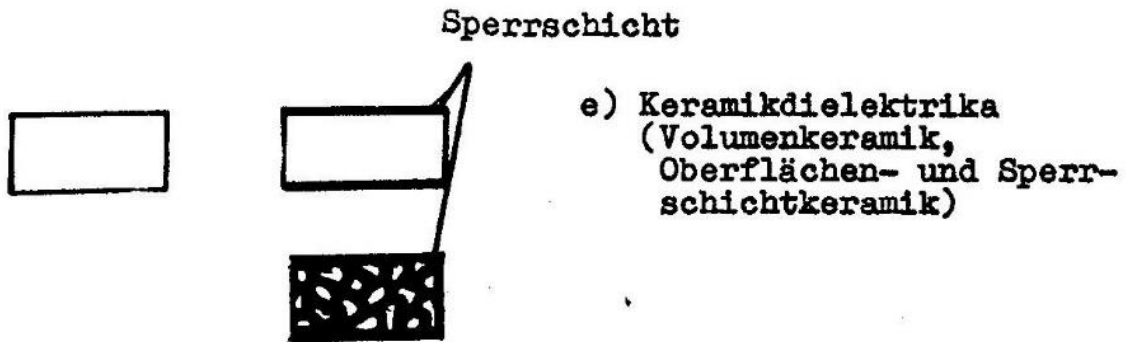


- c) Kondensatorwickel mit organischem Dünnschichtdielektrikum (Metallschichtelektroden) auf isolierender Trägerfolie

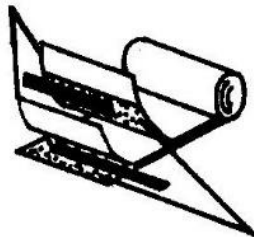
Stirnflächen-
metallisierung



d) Vielschicht-Bauform
(Keramik-, Glimmer- u.a. Kondensatoren)

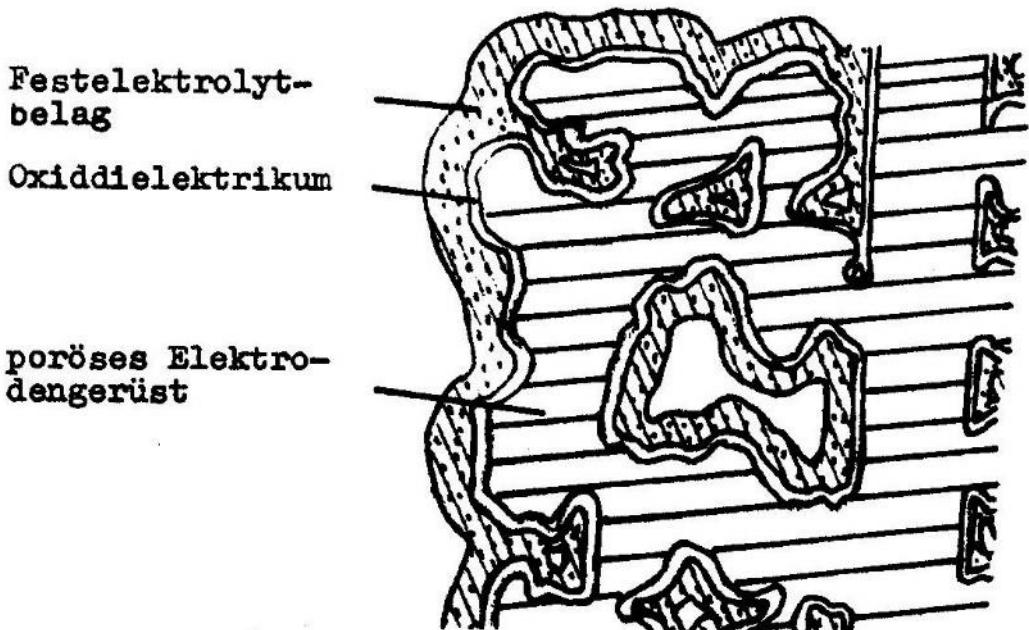


poröser Abstandhalter
(elektrolytgetränkt)

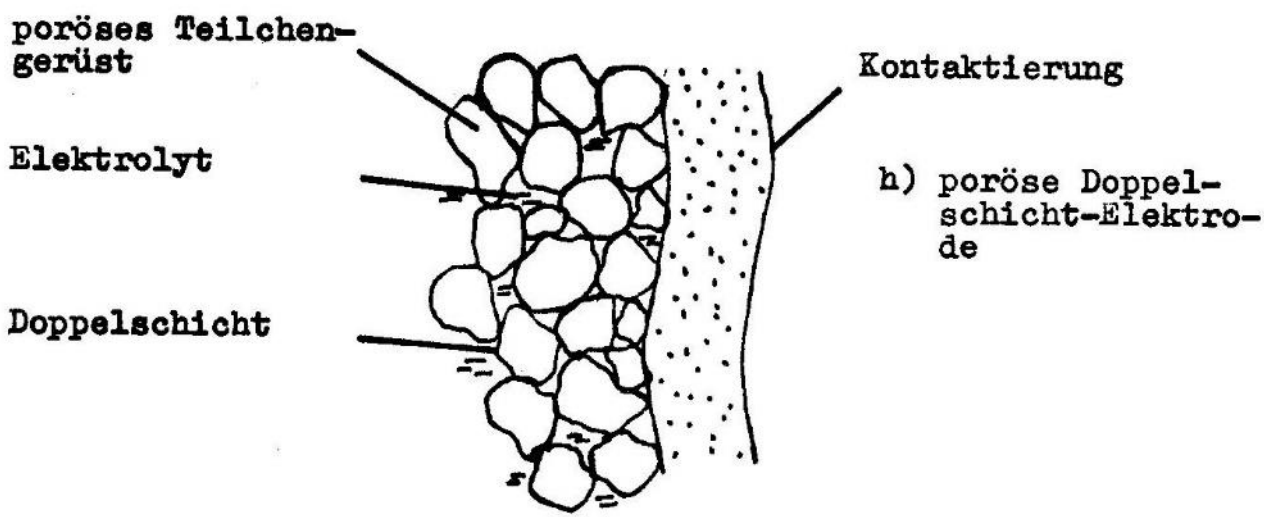


poröse Folielektroden
(anodisch oxydiert)

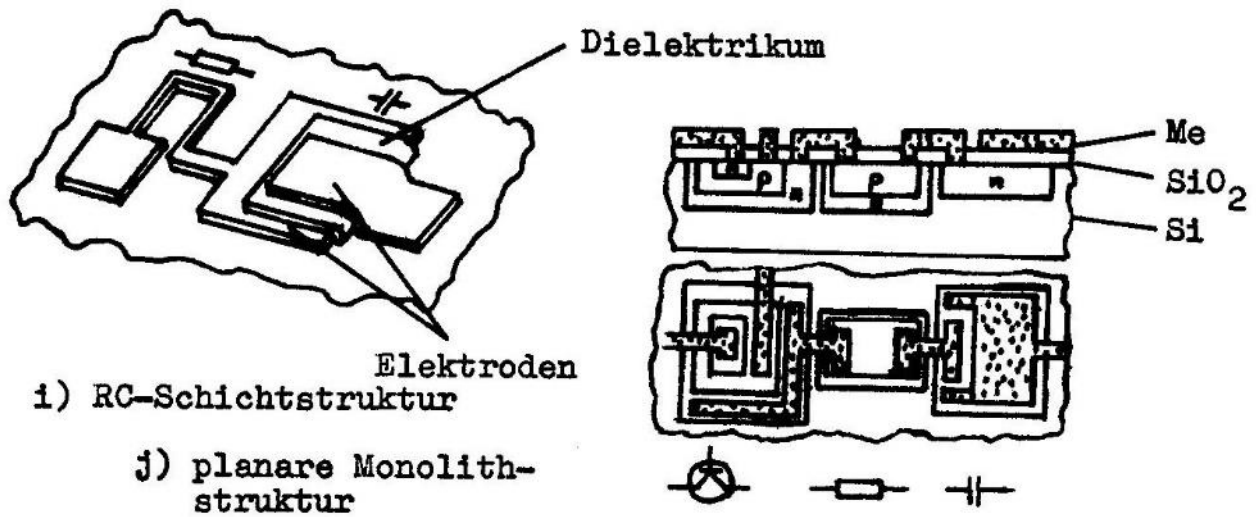
Bild 4 : Prinzipien der inneren Kondensatorkonstruktion



g) poröse Oxidelektrode mit Festelektrolyt-
elektrode



h) poröse Doppel-
schicht-Elektro-
de



i) RC-Schichtstruktur

j) planare Monolith-
struktur

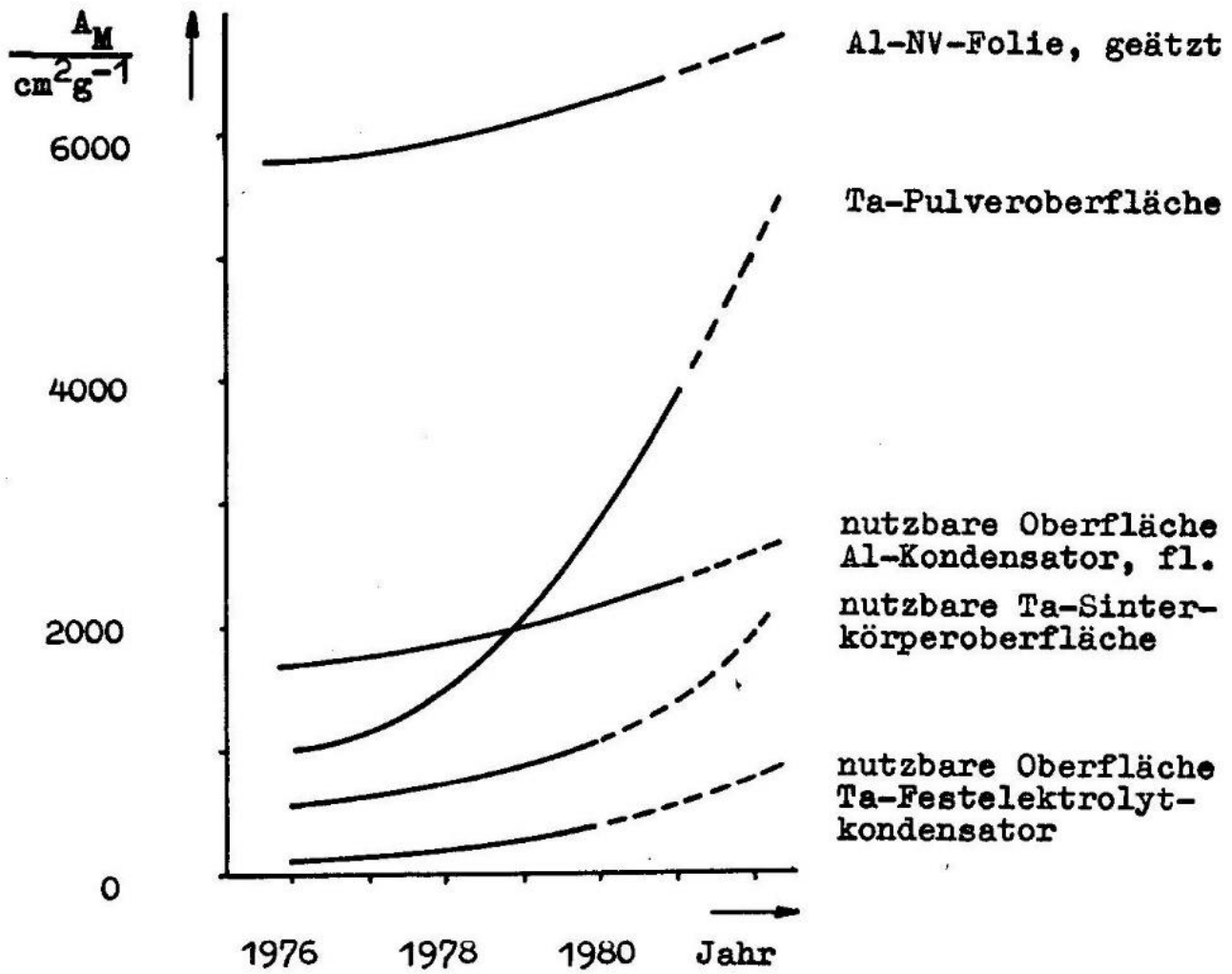
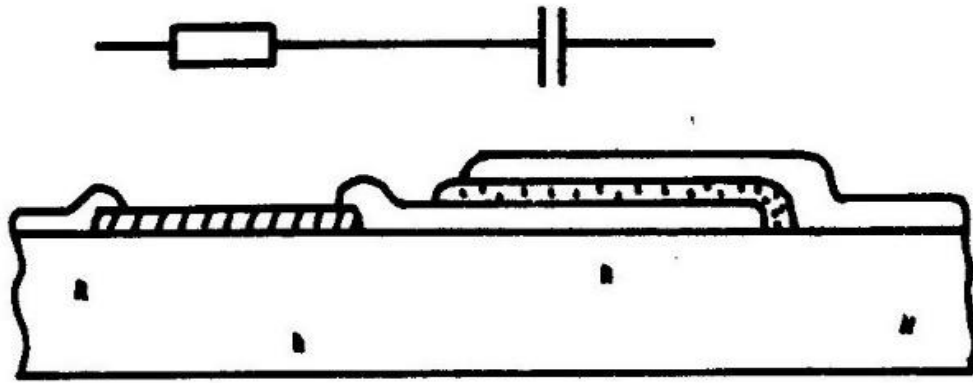
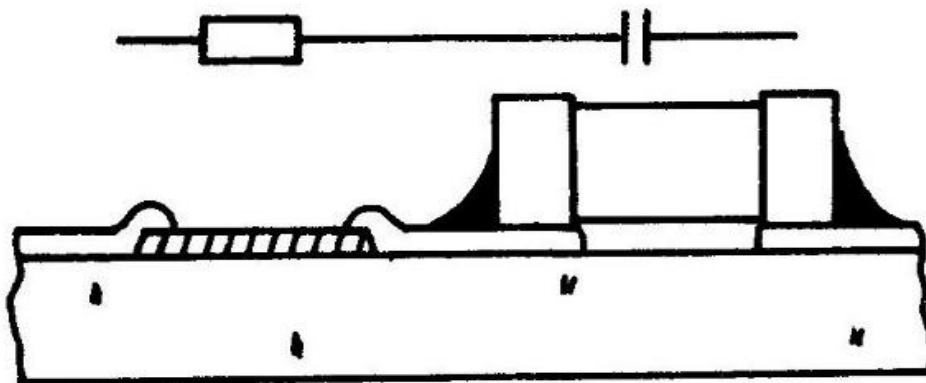


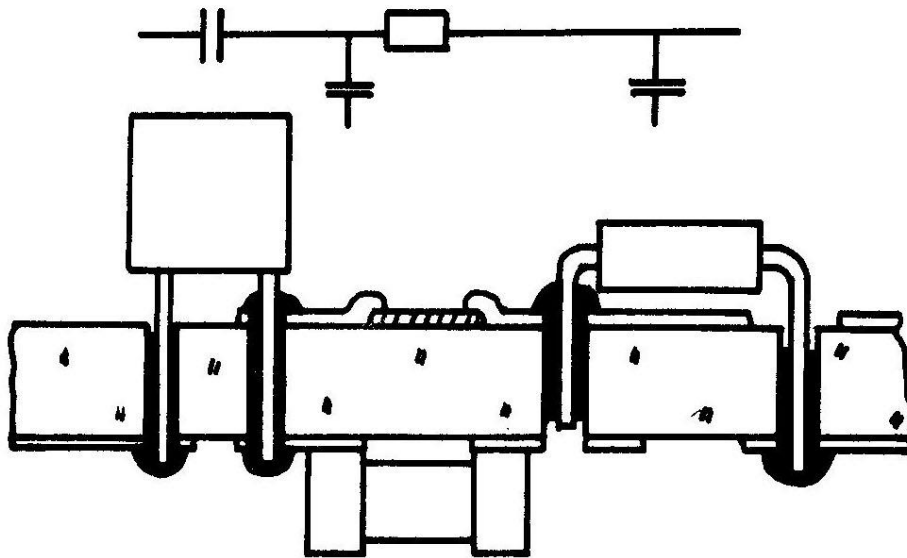
Bild 5 : Entwicklung der nutzbaren Oberfläche pro Masse (A_M) bei Konstruktionselementen, Ausgangsstoffen und am Bauelement von Elektrolytkondensatoren



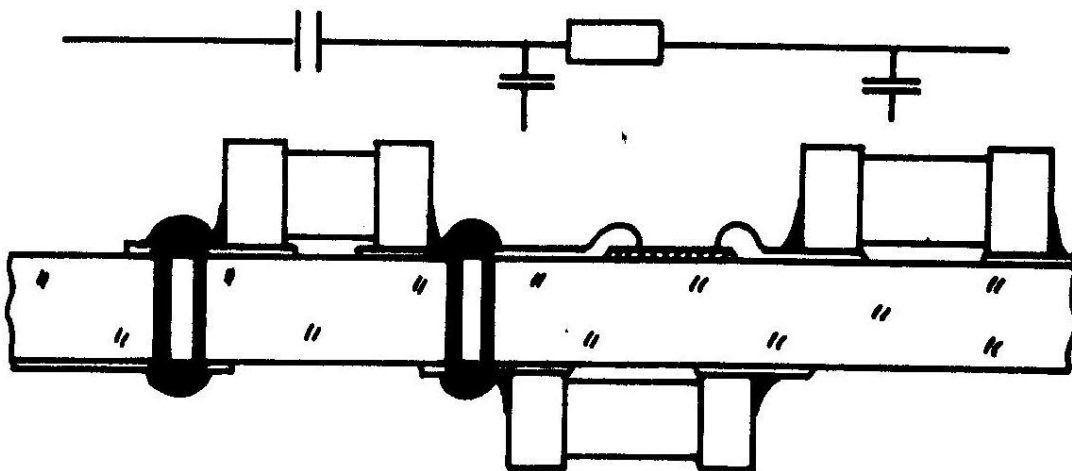
a) Schichtschaltkreis



b) Hybridschaltkreis mit Einbaukomponenten



c) zweiseitige Leiterplatte mit Schichtwiderständen und diskreten Bauelementen mit (axial, radial) und ohne Anschlußdrähten



d) zweiseitige Leiterplatte mit Schichtwiderständen und Einbaukomponenten ohne Anschlußdrähten

Bild 6: Verschiedene Stufen der Mikro- und Makrointegration von Bauelementen auf anorganischen und organischen Substraten bzw. Leiterplatten

Zu Bild 7 :

Gruppenbezeichnungen für Kondensatoren mit konstanter Kapazität, gültig für die UdSSR seit dem Jahr 1960

Bezeichnung	dielektrischer Werkstoff/ Konstruktion
K10	Keramik, $U_N < 1600V$
K15	Keramik, $U_N \geq 1600V$
K20	Quarz
K21	Glas
K22	Glaskeramik
K23	Glasemaille
K31	Glimmer, geringe Leistung
K32	Glimmer, hohe Leistung
K40	Papier, Metallfolien, $U_N \geq 1600V$
K42	Papier, metallisiert
K50	Al-Oxid, Elektrolyt, Folie
K51	Ta-, Nb-u.a.Oxide, Elektrolyt, Folie
K52	Metalloxid, Elektrolyt, poröse Met.-
K53	Metalloxid, Halbleiter anode
K54	Metalloxid, Elektrolyt, Drahtanode
K55	Oxid-Metall
K60	Luft
K61	Vakuum
K70	Polystyrol, Metallfolien
K71	Polystyrol, metallisiert
K72	Polytetrafluoräthylen
K73	Polyäthylenterephthalat, metallis.
K74	Polyäthylenterephthalat, Metallfol.
K75	Kombinationstyp (Kunststoffolie-
K76	Lackschicht Papier)

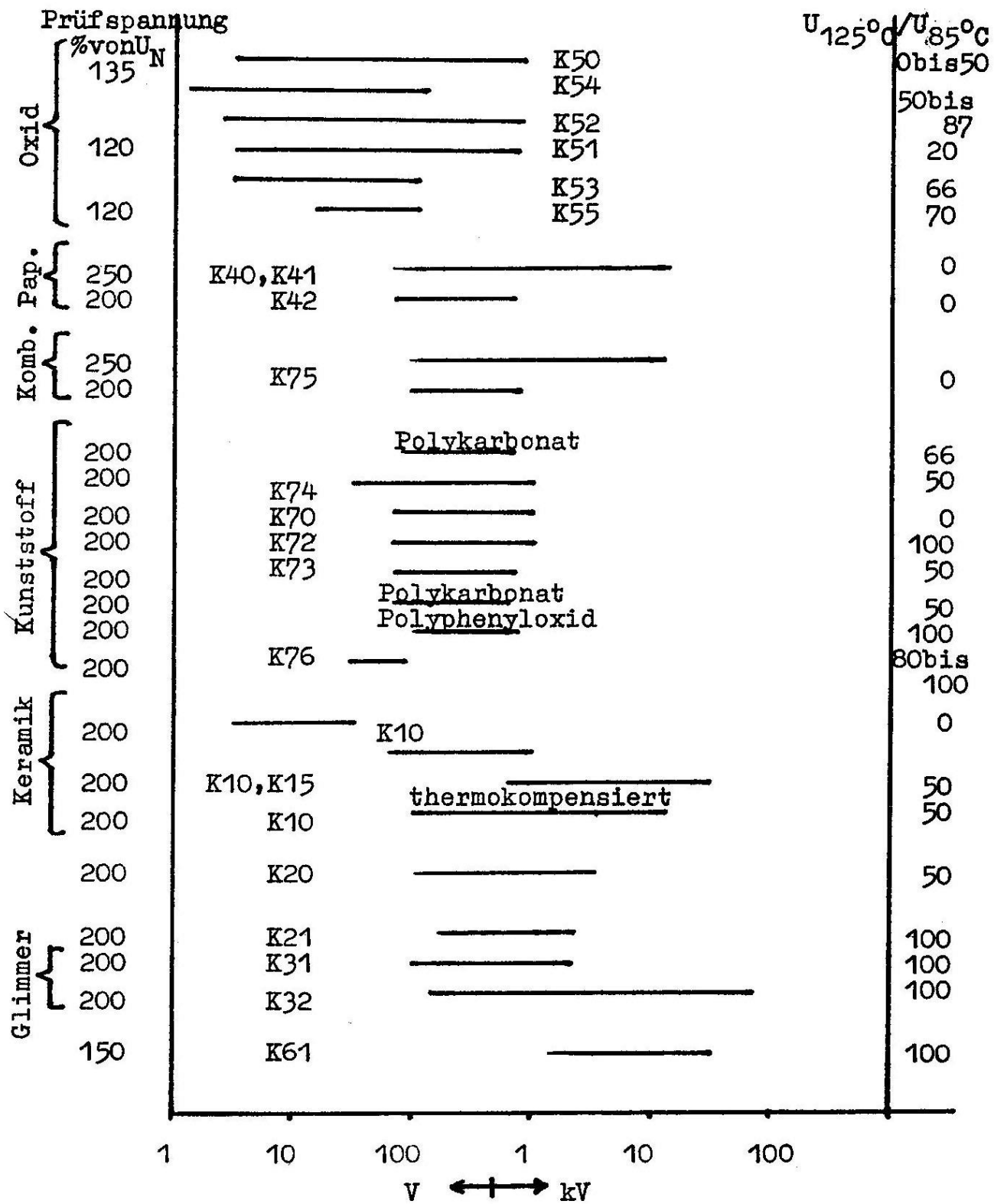


Bild 7a : Nenngleichspannungsbereiche für $T=85^\circ C$, Spannungsderating und Prüfspannung

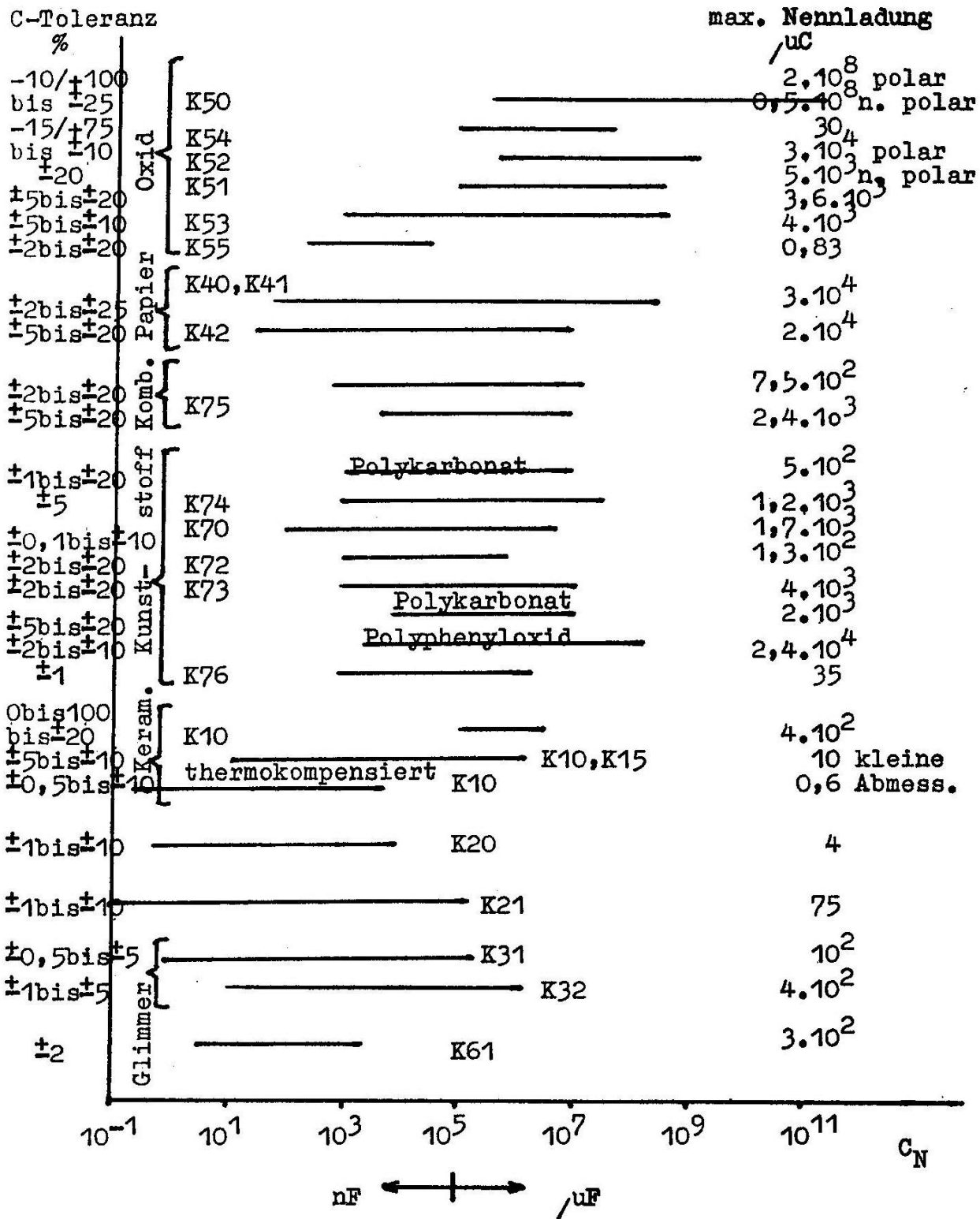


Bild 7b : Nennkapazitätsbereiche, Kapazitätstoleranz, maximale Nennladung

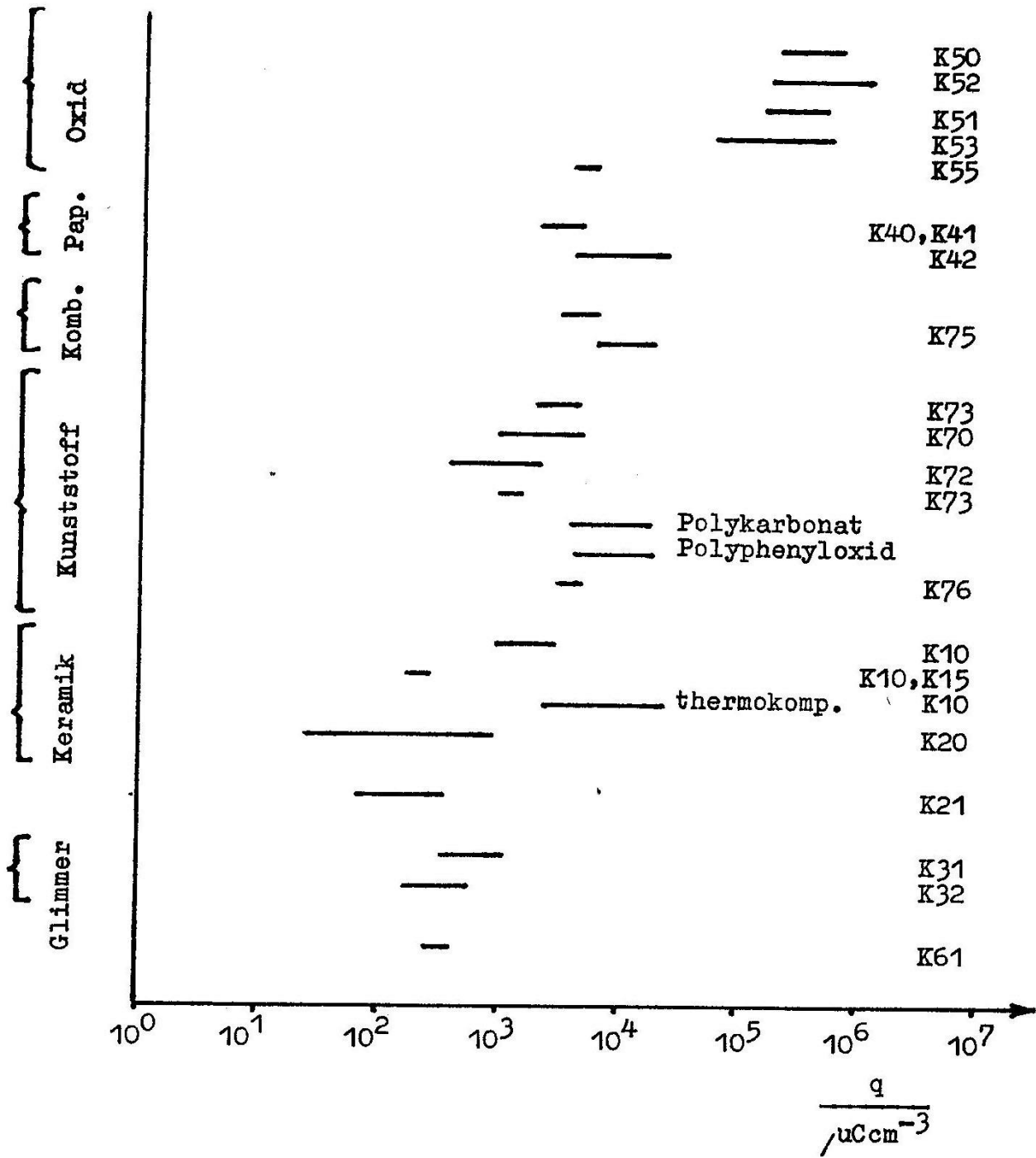


Bild 7c : Bereiche der spezifischen Ladung

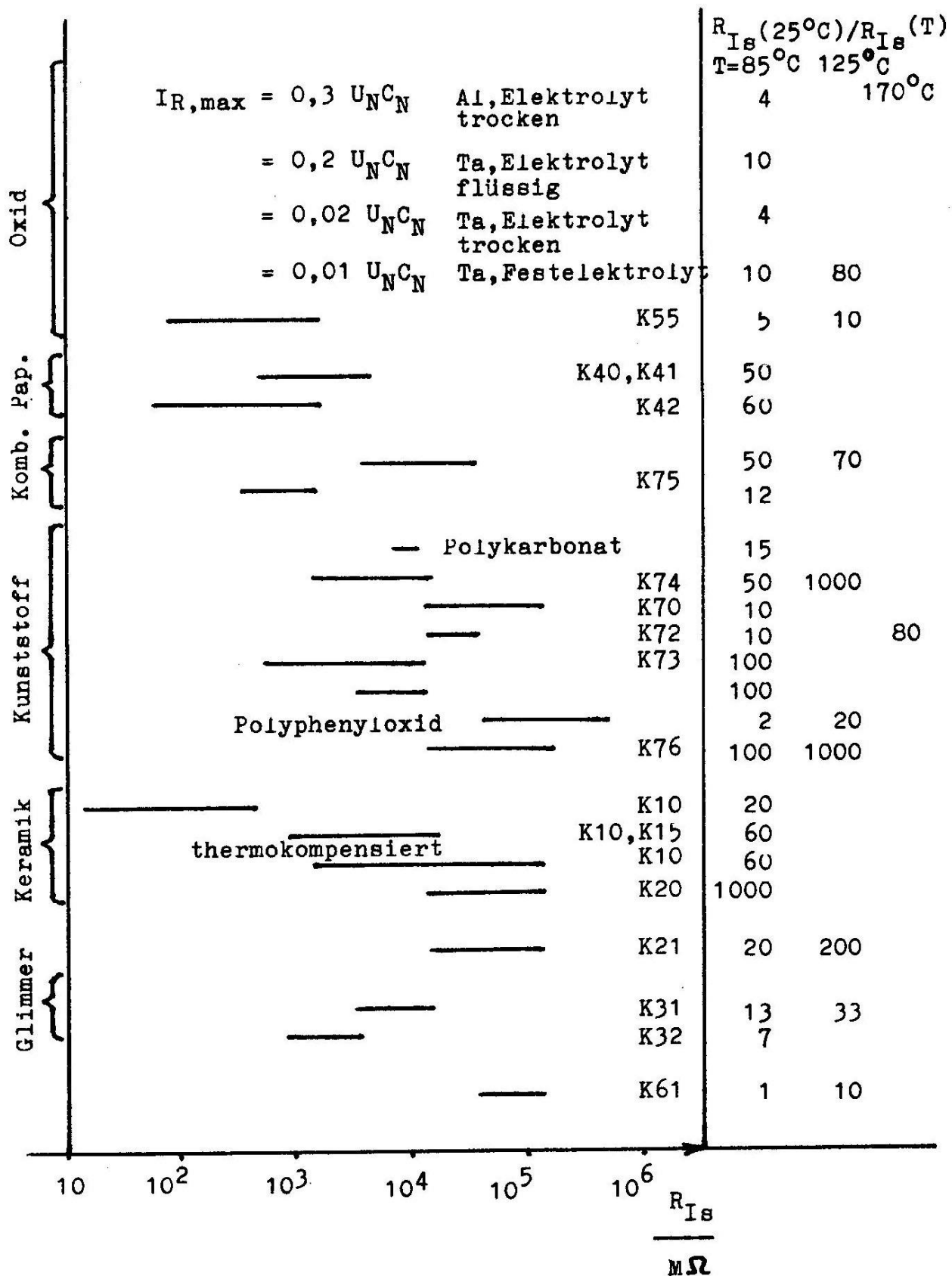


Bild 7d : Bereiche der Isolationskennwerte bei $T = 25^{\circ}C$ und Verhältnisse von R_{Is} bei erhöhter Temperatur, bezogen auf Raumtemperatur

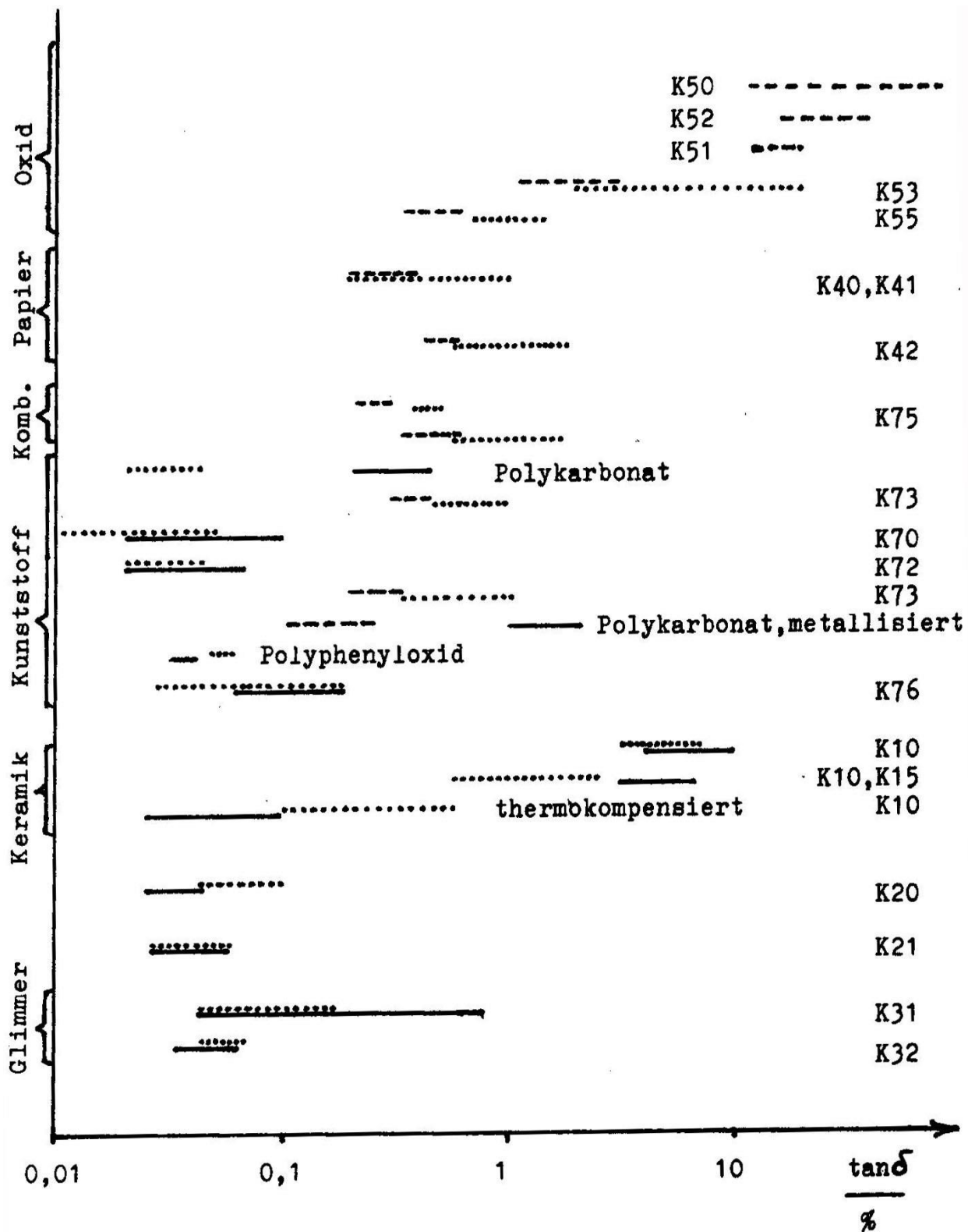


Bild 7e: Verlustfaktor bei verschiedenen Frequenzen und $T=25^{\circ}\text{C}$
 --- $f=120$ Hz; ... $f=1$ kHz; — $f=1$ MHz

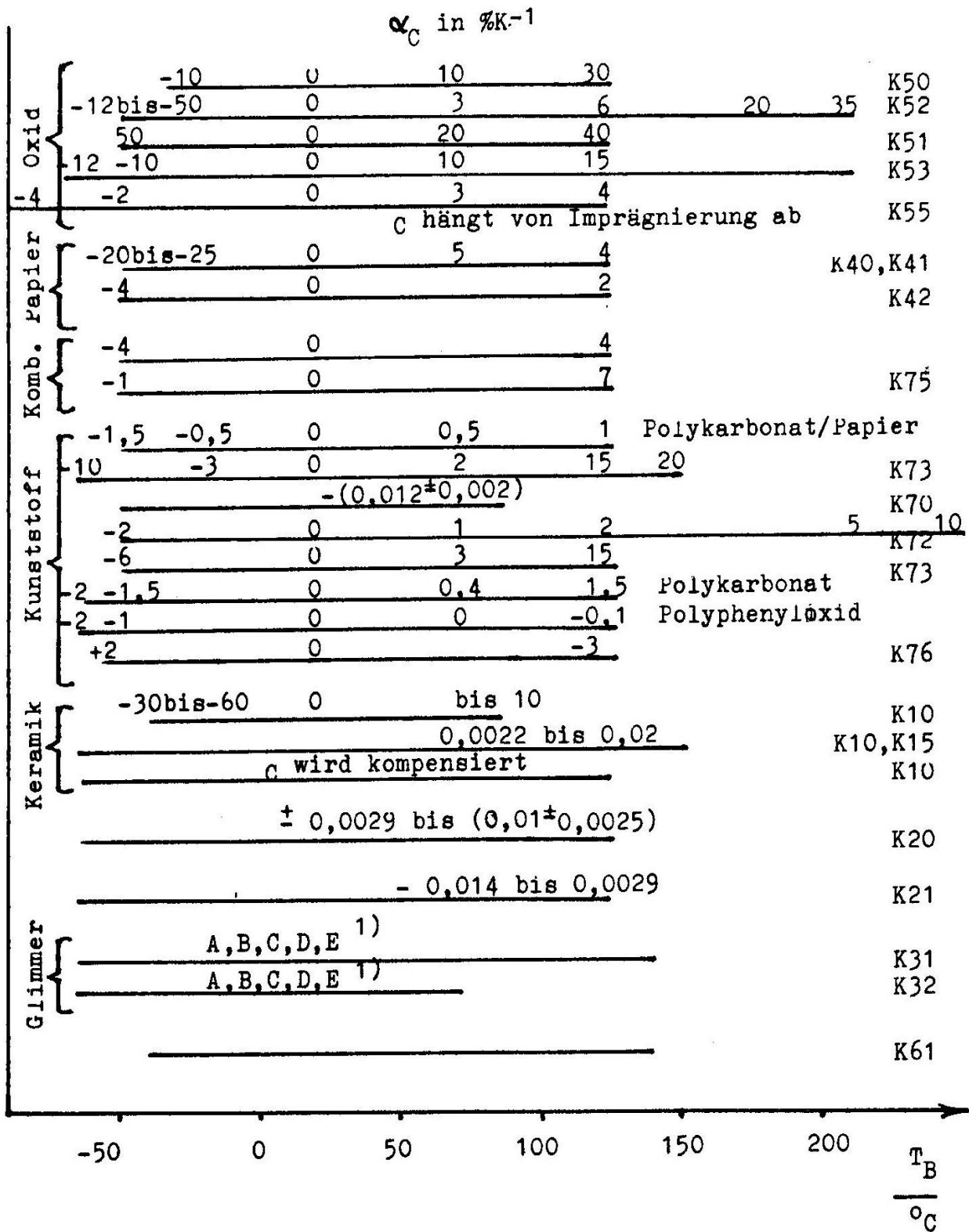


Bild 7f : Betriebstemperaturbereichs und Temperaturkoeffizienten der Kapazität
 A nicht festgelegt; B $\pm 0,02$; C $\pm 0,001$
 D -0,002 bis 0,01; E 0 bis 0,007

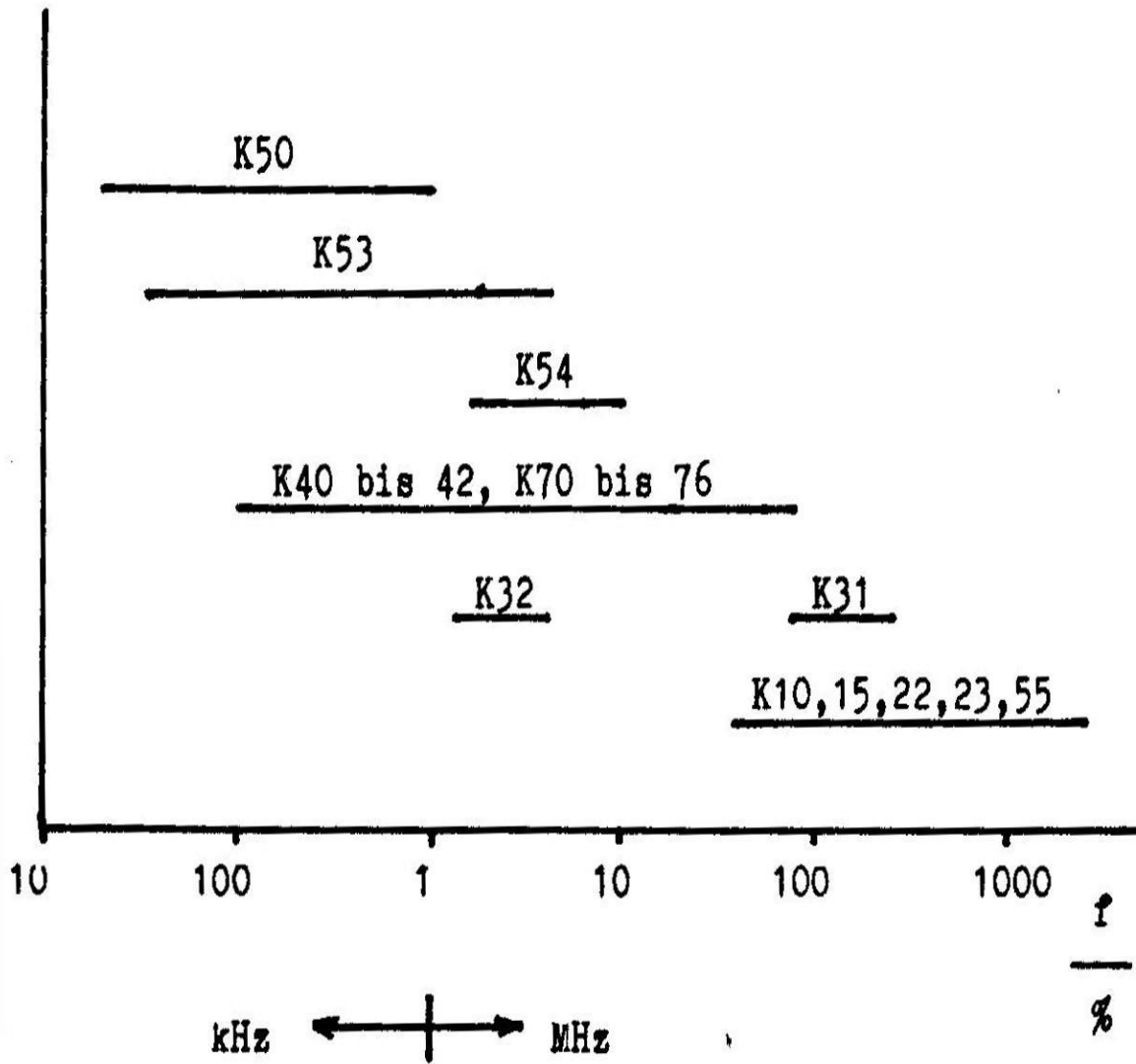


Bild 7g: Orientierende Angaben zum Resonanzfrequenzbereich

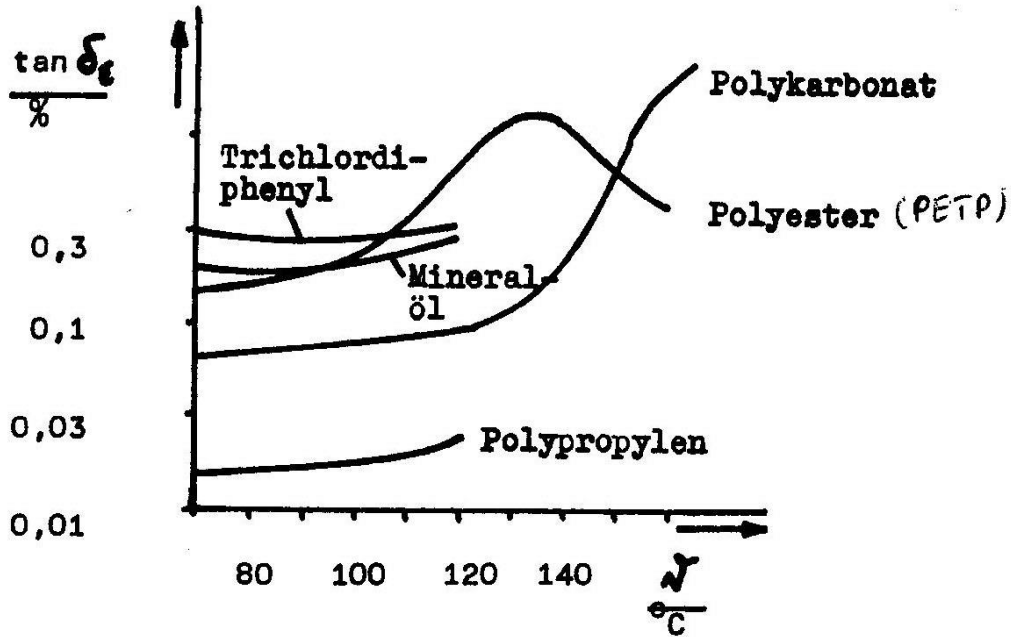


Bild 8: Verlustfaktor ($f=50$ Hz) dielektrischer Materialien in Abhängigkeit von der Temperatur T

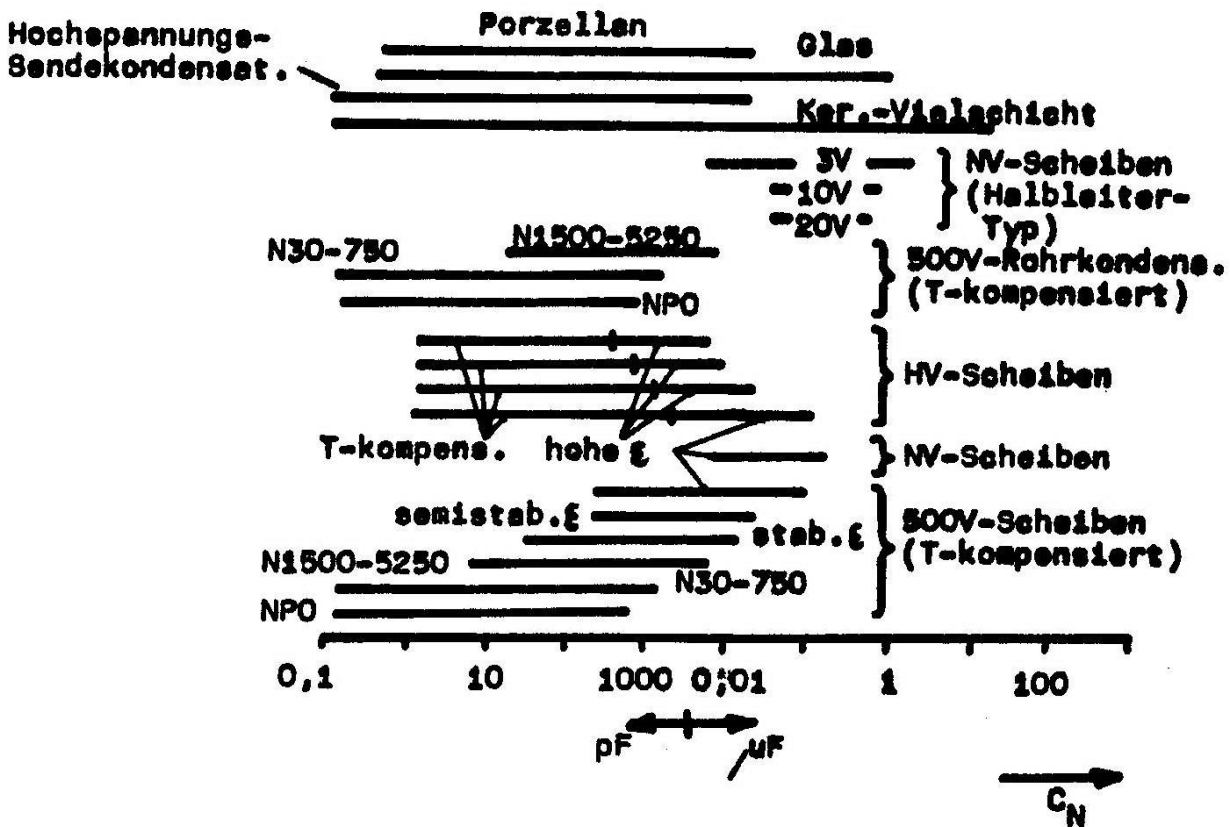


Bild 9: Kapazitätsbereiche von Porzellan-, Glas- und Keramikkondensatoren